



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
E MEIO AMBIENTE**



NÍVEL DE MESTRADO

DOUGLAS VIEIRA LEITE

**ANÁLISE DO POTENCIAL DO USO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO NO PERÍMETRO IRRIGADO PIAUÍ NO
MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE**

São Cristóvão - Sergipe
2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE**



DOUGLAS VIEIRA LEITE

**ANÁLISE DO POTENCIAL DO USO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO NO PERÍMETRO IRRIGADO PIAUÍ NO
MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE**

Projeto de Pesquisa apresentado como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Desenvolvimento e Meio
Ambiente.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli

São Cristóvão – Sergipe
2016

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Leite, Douglas Vieira

L533a Análise do potencial do uso da energia solar em sistemas de bombeamento para irrigação no perímetro irrigado Piauí no município de Lagarto/SE / Douglas Vieira Leite ; orientador Gregorio Guirado Faccioli. – São Cristóvão, 2016.
121 f. : il.

Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)
– Universidade Federal de Sergipe, 2016.

1. Meio ambiente. 2. Energia solar. 3. Sistemas de energia fotovoltaica. 4. Irrigação. 5. Estações de bombeamento. 6. Sergipe. Faccioli, Gregorio Guirado, orient. II. Título.


CDU 502/504:551.521.37(813.7)

DOUGLAS VIEIRA LEITE


ANÁLISE DO POTENCIAL DO USO DA ENERGIA SOLAR EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO NO PERÍMETRO IRRIGADO PIAUÍ NO MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe.


Aprovada em 24 de fevereiro de 2016.



Prof. Dr. Gregorio Guirado Faccioli – Universidade Federal de Sergipe
Presidente - Orientador

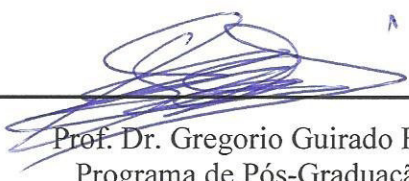


Prof. Dr. Inajá Francisco de Souza – Universidade Federal de Sergipe
Examinador Interno



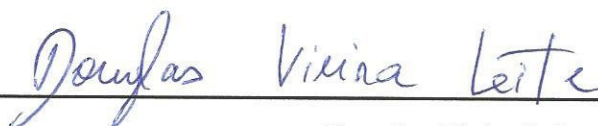
Prof. Dr. José Espínola Júnior – Instituto Federal de Sergipe
Examinador Externo

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente concluído no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS)



Prof. Dr. Gregorio Guirado Faccioli
Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe – UFS

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) responsável pelo Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Dissertação e emprestar ou vender tais cópias.



Douglas Vieira Leite
Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe – UFS



Prof. Dr. Gregorio Guirado Faccioli
Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA
Universidade Federal de Sergipe – UFS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Nilson e Delma, por todo o apoio incondicional e suporte dado em toda a minha vida. Aos meus irmãos, Davi e Diego, pela boa convivência e compartilhamento de todas as expectativas e anseios.

À minha companheira, Fernanda, que de uma maneira mais próxima, vivenciou junto comigo cada etapa para a concretização deste trabalho.

Aos professores do PRODEMA que contribuíram para uma grande expansão no horizonte dos meus conhecimentos, me fazendo trilhar caminhos antes inimagináveis.

Toda a turma PRODEMA/2014 pela união e companheirismo.

Ao meu orientador Gregorio Guirado Faccioli, pelo empenho e ajuda fundamental na condução do trabalho nos momentos mais importantes.

À COHIDRO pela disponibilização dos dados que foram essenciais para esta conclusão.

A todos os demais colegas e amigos que de alguma forma contribuíram com sugestões ou simplesmente demonstraram apoio em toda essa caminhada.

RESUMO

A questão energética é um foco de importante discussão na atualidade na medida em que as atividades humanas estão se tornando cada vez mais dependentes de recursos que possam suprir o aumento da demanda. A partir dessa problemática têm-se buscado soluções nas fontes alternativas de energia, menos impactantes, que aos poucos tendem a substituir os modelos convencionais na direção de uma matriz mais diversificada. A energia solar torna-se uma opção a se considerar no Brasil frente ao grande potencial teórico existente, sendo o SFVI (Sistema Fotovoltaico de Irrigação), uma das aplicações dos sistemas fotovoltaicos. O trabalho presente propõe estudar o potencial do uso da energia solar em sistemas fotovoltaicos de irrigação no perímetro irrigado Piauí localizado no município de Lagarto/SE. Em sua metodologia, o estudo envolve a estimativa da radiação solar local através do modelo de Angstrom-Prescott a partir da determinação dos coeficientes da equação e do comparativo entre os valores estimados e reais; o dimensionamento do sistema fundamentado nas demandas hídricas das culturas envolvidas e comparação com o modelo convencional. Os resultados mostraram que para o município de Lagarto, a radiação solar global horizontal pode ser estimada através do uso dos coeficientes encontrados na partição mensal (com coeficiente a variando entre 0,31 e 0,37 e b entre 0,32 e 0,42) e os dados de insolação (n). A radiação solar média anual estimada encontrada na região foi de 19,66 MJ/m²dia, com o valor mínimo de 14,45 MJ/m²dia no mês de junho e máximo de 23,94 MJ/m²dia em novembro. Os índices de radiação solar estimados mostraram que a região estudada possui um elevado potencial para o uso de energia solar em geral. Nos sistemas fotovoltaicos de irrigação, para suprir a demanda hídrica máxima encontrada em cada 0,5 ha em sistemas de 5 a 60 m.c.a são requeridas potências instaladas dos módulos fotovoltaicos de 310 Wp a 3,4 kWp, conforme o gráfico de dimensionamento elaborado. No comparativo com o sistema convencional o SFVI é competitivo em sistemas com alturas manométricas de até 30 m.c.a e sua aplicabilidade varia de acordo com a fonte de água disponível.

Palavras-chave: bombeamento fotovoltaico, energia solar, irrigação

ABSTRACT

The energy issue is a focus of important discussion today when the human activities are becoming increasingly dependent on resources that can supply the increased demand. From these problematics, it has been sought solutions in alternative energy sources, less impacting, which gradually tend to substitute conventional models toward a more diversified array. Solar energy becomes an option to consider in Brazil against the large existing potential, and the photovoltaic system of irrigation, one of the applications of photovoltaic systems. This paper proposes to study the potential use of solar energy in photovoltaic irrigation systems in Lagarto/SE. The study involves an estimated local solar radiation using the Angstrom-PreScott model by the determination of the equation coefficients and comparison between the estimated and actual values; the system design based on water demands of crops involved and cost compared to the conventional model. The results showed that for Lagarto/SE, the horizontal solar radiation can be estimated by the use of coefficients found in the monthly partition (coefficient a between 0.31 and 0.37 and b between 0.32 and 0.42) and insolation data (n). The estimated average annual solar radiation found in the region was 19.66 MJ/m²dia, with a minimum value of 14.45 MJ/m²dia in June and maximum of 23.94 MJ/m²dia in November. The estimated solar radiation indices showed that the study area has a high potential for solar energy applications in general. The photovoltaic irrigation systems to supply the maximum water demand found in every 0.5 ha in systems of 5 to 60 m (head) are required installed photovoltaic modules of 310 Wp to 3.4 kWp. Compared to the conventional system, the photovoltaic is competitive in systems with head up to 30 m and their applicability varies with the source of water available.

Key-words: photovoltaic pumping, solar energy, irrigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Previsão do consumo de energia até 2060.	20
Figura 2 - Matriz energética brasileira em 2013.....	21
Figura 3 - Componentes de radiação ao atingir a Terra	23
Figura 4 - Piranômetro fotovoltaico LiCor	24
Figura 5 - Heliógrafo de Campbell Stokes utilizado para medições de insolação.	25
Figura 6 – Piroheliômetro para a medição de radiação perpendicular à superfície.	25
Figura 7 - Células fotovoltaicas (a) Silício monocristalino (mono-Si) (b) Silício POLicristalino (poly-Si) (c) Silício amorfo (a-Si)	28
Figura 8- Evolução da potência instalada anualmente de 2000 a 2011. APAC: Ásia e Pacífico, MEA: Oriente Médio e África, ROW: Resto do Mundo.	29
Figura 9- Esquema do sistema fotovoltaico de irrigação.	30
Figura 10– Configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico.	31
Figura 11– Sistemas Fotovoltaicos de irrigação Jaén, Espanha.	32
Figura 12– Perímetro Irrigado Piauí no Estado de Sergipe.....	36
Figura 13 - Área de cultivo de pimenta no Perímetro Irrigado Piauí.....	38
Figura 14– Estação do INMET localizada em Itabaianinha que forneceu os dados históricos de radiação solar global (R_s) e insolação (n) para a determinação dos coeficientes da equação de Angstrom – Prescott para a região de estudo.....	40
Figura 15– Estação Agrometeorológica da COHIDRO em Lagarto.	40
Figura 16– Heliógrafo do tipo Campbell-Stokes no local de estudo.....	41
Figura 17– Regressão linear para a determinação dos coeficientes de Angstrom para a partição geral.....	53
Figura 18 -Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes encontrados pela partição geral.	56
Figura 19- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados ($R_{G_{est}}$) e os valores de radiação solar observados ($R_{G_{real}}$) com os coeficientes encontrados pela partição mensal.	57

Figura 20- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes encontrados pela partição por estação seca/chuvosa.....	58
Figura 21- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes da FAO.	59
Figura 22– Rotina criada para o cálculo da radiação solar global utilizando os coeficientes da partição	62
Figura 23– Médias mensais estimadas para a radiação solar global horizontal em Lagarto. ..	64
Figura 24– Gráfico com as médias mensais de precipitação da série histórica e a precipitação total mensal para o ano de 2011.	66
Figura 25– Definição das variáveis climáticas de entrada no software ET ₀ calc.	66
Figura 26– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Janeiro.....	70
Figura 27– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Fevereiro.	70
Figura 28– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Março.....	71
Figura 29– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Abril.....	71
Figura 30 – Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Maio	72
Figura 31– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Junho.....	72
Figura 32– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Julho.....	73
Figura 33– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Agosto.....	73
Figura 34– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Setembro.	74
Figura 35– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Outubro.....	74
Figura 36– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Novembro.	75
Figura 37 – Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Dezembro.....	75
Figura 38– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 5 m.c.a.....	77
Figura 39– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 10 m.c.a.....	77
Figura 40– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 15 m.c.a.....	78
Figura 41– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 20 m.c.a.....	78
Figura 42– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 25 m.c.a.....	79

Figura 43– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 30 m.c.a.	79
Figura 44– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 35 m.c.a.	80
Figura 45– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 40 m.c.a.	80
Figura 46– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 45 m.c.a.	81
Figura 47– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 50 m.c.a.	81
Figura 48– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 55 m.c.a.	82
Figura 49– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 60 m.c.a.	82
Figura 50– Poços tubulares existentes na região do perímetro irrigado Piauí.	84
Figura 51– Comparativo de altura manométrica x tempo de retorno de investimento para os preços mínimos, médios e máximos de módulos fotovoltaicos encontrados no mercado brasileiro em 2015.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Valores climatológicos obtidos a partir de série histórica para o município de Lagarto.	37
Tabela 2– Dados de referência das estações utilizadas.	41
Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa pelo índice “c” Camargo & Sentelhas (1997)	45
Tabela 4– Dados obtidos para a partição geral.	53
Tabela 5– Dados obtidos para a partição mensal.	54
Tabela 6– Dados obtidos para a partição por estação seca/chuvosa.	54
Tabela 7 - Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição geral.	56
Tabela 8–Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição mensal.	57
Tabela 9 –Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição por estação seca/chuvosa.	58
Tabela 10 - Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição utilizando os coeficientes FAO.	59
Tabela 11– Resultados da aplicação índice de Willmot (d), o coeficiente de correlação (r) e índice de confiança e desempenho (c)	60
Tabela 12– Resultados da aplicação do erro médio (EM)	60
Tabela 13– Médias mensais da radiação solar global estimada (MJ/m ² dia) para a série histórica.	63
Tabela 14– Medias de radiação solar global mensais gerais.	63
Tabela 15- Valores de radiação global, direta, difusa e inclinada.	65
Tabela 16– Valores máximos de ETo.	67
Tabela 17– Dados de produção do perímetro irrigado Piauí para o ano de 2014.	67
Tabela 18– Dados referentes às principais culturas presentes no Perímetro Irrigado Piauí. ...	68
Tabela 19– Demanda hídrica para o lote padrão de 0,5 ha.	69

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
1.1. A Energia e o Desenvolvimento Sustentável	19
1.2. A Matriz de Produção Energética Mundial	20
1.2.1. A matriz energética no Brasil.	21
1.3. A Energia Solar	22
1.3.1. Conceitos de radiação	23
1.3.2. Medição da radiação	23
1.3.3. Principais instrumentos de medição	24
1.3.4. Estimativa de radiação	25
1.3.6. A energia solar fotovoltaica	26
1.4. Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico de Irrigação (SFVI)	29
1.5. O SFVI no Mundo	32
1.5.1. O SFVI no Brasil	33
1.6. Irrigação	34
CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA	36
2.1. Caracterização da Área de Estudo	36
2.2. Estimativa da Radiação Solar Local	38
2.2.1. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom-Prescott com dados de Itabaianinha	41
2.2.2. Cálculo da estimativa de radiação solar global em Lagarto	45
2.3. Demanda Hídrica para Irrigação	46
2.4. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.	48
2.5. Análise Comparativa	50

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	53
3.1 – Coeficientes da Equação de Angstrom Prescott.....	53
3.1.1. Partição geral.....	53
3.1.2. Partição mensal.....	53
3.1.3. Partição por estação seca e chuvosa	54
3.1.4. Comparativo entre valores estimados e observados	55
3.1.5. Aplicação dos índices estatísticos.	60
3.2. Estimativa da Radiação Solar em Lagarto.....	61
3.2.1. Estimativa da radiação solar no plano ótimo de inclinação.	64
3.4. Caracterização das Principais Culturas.....	67
3.4.1. Dados de produção do Perímetro Irrigado Piauí.	67
3.5. Demanda Hídrica das Culturas e Potência de Instalação do Sistema Fotovoltaico	68
3.6. Análise Econômica Comparativa	76
3.6.1. Altura Manométrica Total (AMT) de 5 m.c.a.....	77
3.6.2. Altura Manométrica Total (AMT) de 10 m.c.a.....	77
3.6.3. Altura Manométrica Total (AMT) de 15 m.c.a.....	78
3.6.4. Altura Manométrica Total de (AMT) de 20 m.c.a	78
3.6.5. Altura Manométrica Total de (AMT) de 25 m.c.a.	79
3.6.6. Altura Manométrica Total de (AMT) de 30 m.c.a	79
3.6.7. Altura Manométrica Total de (AMT) de 35 m.c.a	80
3.6.8. Altura Manométrica Total de (AMT) de 40 m.c.a	80
3.6.9. Altura Manométrica Total de (AMT) de 45 m.c.a	81
3.6.10. Altura Manométrica Total de (AMT) de 50 m.c.a	81
3.6.11. Altura Manométrica Total de (AMT) de 55 m.c.a	82
3.6.12. Altura Manométrica Total de (AMT) de 60 m.c.a	82
CAPÍTULO 4	87
4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87

REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA EM ITABAIANINHA	96
APÊNDICE B - GRÁFICOS DE OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE ANGSTROM PRESCOTT PARA A PARTIÇÃO MENSAL E PARTIÇÃO POR PERÍODO SECO/CHUVOSO.....	98
APÊNDICE C – EXEMPLO DE PLANILHA PARA O CALCULO DA POTÊNCIA INSTALADA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	102
APÊNDICE D – GRÁFICO PARA O DIMENSIONAMENTO DO SFVI NO LOCAL DE ESTUDO	103
APÊNDICE E - PLANLHAS DETALHADAS REFERENTES À ANÁLISE COMPARATIVA	104
ANEXO A – CATÁLOGO DE BOMBAS.....	119
ANEXO B – TABELA AUXILIAR PARA CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO PVC.	120

INTRODUÇÃO

Diante do crescimento tecnológico das últimas décadas e consequentemente do aumento da demanda energética, muito se discute sobre as possibilidades de modos alternativos de geração, englobando questões de eficiência, custo, diversificação da matriz e fatores ambientais. O aumento da necessidade gera importantes preocupações neste setor, como a capacidade em manter o desenvolvimento crescente da economia sem afetar o meio ambiente de maneira catastrófica.

Levando em consideração este cenário, setores ligados à produção e distribuição de energia preveem que tipos de energia como a eólica e fotovoltaica tornem-se competitivas no âmbito da matriz energética vigente. Estudos mostram que a aplicação destes modelos de energia apresenta viabilidade econômica em um período de médio/longo prazo se utilizados de forma correta, possibilitando desta forma a atratividade em termos de produção. No território nacional, especificamente, existe um grande potencial a ser aproveitado no contexto das energias renováveis, além de que a utilização destas fontes de energia está de acordo com a premissa do desenvolvimento sustentável.

A partir das necessidades atuais deve-se buscar uma crescente diversificação na matriz energética através de ações locais ou regionais que possibilitem possíveis mudanças nos hábitos de uso energético. A matriz energética brasileira ainda é dominada pelas hidrelétricas, que mesmo sendo uma energia considerada renovável e livre de emissões dos gases de efeito estufa (GEE's), ainda acarreta uma série de problemas ambientais como o alagamento de grandes áreas e os distúrbios causados nos cursos naturais dos rios, além de que, em tempos de crise hídrica, as termoeletricas são acionadas e geram custos dispendiosos.

Entre as energias renováveis existentes, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma fonte de potencial elevado em aplicações no território brasileiro, em função de apresentar níveis de radiação disponíveis teóricos considerados aplicáveis em diversas finalidades. Uma das aplicações do uso da energia solar fotovoltaica é para o acionamento de moto bombas destinadas ao uso na irrigação. No contexto da energia solar, o SFVI (Sistema Fotovoltaico de Irrigação) se torna atraente por não necessitar uso de baterias, além de que a época de maior demanda de água coincide com a época de maior incidência solar e

que as regiões mais áridas que apresentam maior necessidade hídrica são áreas com maior quantidade de radiação solar disponível. O uso deste sistema, por ser isolado, promove a não dependência da rede elétrica comum ou mesmo pode substituí-la para fins de irrigação de baixa pressão.

O perímetro irrigado Piauí foi inaugurado em 1987 através de incentivos do governo do Estado de Sergipe, que após um estudo detalhado entendeu a irrigação como fator de viabilização da produção na pequena, média e grande propriedade. O perímetro possui o cultivo de culturas diversificadas com destaque para a produção de aipim, batata doce, mandioca, maracujá, pimenta malagueta, quiabo e tomate em pequenas propriedades, que juntas renderam uma produção de aproximadamente 80 % do total no ano de 2014. Uma das dificuldades em termos financeiros é o alto gasto em energia elétrica para o bombeamento disponibilizado para a irrigação, mesmo assim, o perímetro Piauí movimenta a economia do município e seus produtos são comercializados para a toda a região centro-Sul do Estado de Sergipe.

A metodologia escolhida pretende elucidar o potencial para uso de sistemas fotovoltaicos de irrigação na região e avaliar a sua viabilidade a médio e longo prazo. Mesmo sendo uma alternativa aceitável e possivelmente competitiva, é preciso, antes de qualquer aplicação avaliar tanto os aspectos técnicos relacionados ao potencial de geração energética e viabilidade econômica, quanto os aspectos de operacionalização e manutenção do sistema, portanto, a introdução de novas tecnologias para melhorar a qualidade de vida em zonas rurais deve ser pautada através do contexto interdisciplinar, levando em consideração todas as variáveis possíveis.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial do uso da energia solar como alternativa em sistemas de bombeamento para irrigação no perímetro irrigado Piauí localizado no município de Lagarto/SE, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais, além de comparar o modelo proposto com o convencional.

O capítulo 1 será destinado à fundamentação teórica, evidenciado a base literal para o entendimento geral do trabalho, partindo do contexto energético a nível mundial e local, apresentação da energia solar fotovoltaica, caracterização do SFVI e a fundamentação do enfoque hídrico. O capítulo 2 elucida a metodologia proposta e se apresenta dividida em cinco subtópicos: caracterização da área de estudo, estimativa da radiação solar local, demanda hídrica para irrigação, dimensionamento do sistema e análise comparativa. No

capítulo 3 demonstram-se quais os resultados do trabalho levando em consideração os objetivos pretendidos. Por fim, o capítulo 4 traz as principais conclusões.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. A Energia e o Desenvolvimento Sustentável

O termo “desenvolvimento sustentável” surgiu a partir de estudos da Organização das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas, como uma resposta para a humanidade perante a crise social e ambiental pela qual o mundo passava. (BARBOSA, 2008). Desde a primeira vez que o termo desenvolvimento sustentável foi citado muito se discute sobre o seu significado em termos práticos, como aplicá-lo e se realmente ele é utilizado de forma apropriada nas discussões ambientais. Uma das definições mais difundidas do conceito está contida no relatório *Brundtland*, no documento intitulado ‘Nosso Futuro Comum’, publicado em 1987 e elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, o relatório define o desenvolvimento sustentável como sendo o desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras atenderem suas próprias necessidades.

O desenvolvimento tecnológico do século XX e a consequente Revolução Industrial pressionou a sociedade moderna na direção do progresso inexorável com base na apropriação da natureza de forma a obter da mesma seus serviços de forma exploratória sem atenção ideal em relação à finitude dos seus recursos. Após um longo período de utilização deste paradigma sem reflexões profundas, o momento presente pode ser considerado como ponto chave na forma de pensar sobre o caminho que seguimos e as perspectivas futuras em relação ao comportamento humano e os anseios de desenvolvimento e progresso com base na ciência. A partir da segunda metade do século XX uma nova discussão com um cerne voltado ao meio ambiente surgiu trazendo consigo novos termos e conceitos como pegada ecológica, serviços ecossistêmicos, debates sobre o uso de energias renováveis e o aquecimento global.

A difusão e utilização crescente de novos paradigmas ambientais permitem vislumbrar um ambiente mais positivo para a humanidade, onde a busca pela eficiência tecnológica, econômica e competitiva possa caminhar paralelamente com a busca de solidariedade entre as pessoas e a natureza. (ASMUS, 1999, p.292)

Toda esta discussão, embasada pelo método científico, tem contribuído de forma profunda para uma nova forma de desenvolvimento, baseada em uma mudança de

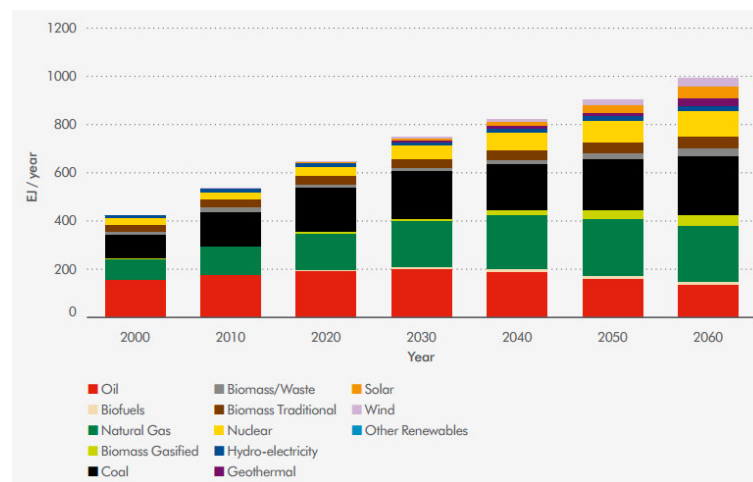
paradigma, levando em consideração valores mais amplos e mais coerentes com a realidade do planeta.

1.2. A Matriz de Produção Energética Mundial

A matriz energética mundial em seu histórico apresenta uma forte associação ao uso do petróleo e dos combustíveis fósseis, que mesmo depois da crise da década de 70 ainda tem papel fundamental no cenário da energia. Dados do IEA (*Internacional Energy Agency*) mostram que de 1971 a 2010 a demanda mundial por energia subiu de 6000 para 18000 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) e que do total demandado, cerca de 67 % ainda se originam de combustíveis fósseis, neste sentido, observa-se ainda uma grande dependência deste tipo energético. As energias do tipo renovável correspondem a 19% do total, sendo que o tipo de mais destaque é a energia hidrelétrica. Os demais tipos ainda possuem pouca expressão no contexto geral.

As projeções a longo prazo apontam para um crescimento nos investimentos no âmbito das energias renováveis, sempre com foco na redução dos custos de fabricação de componentes e instalação, além da busca pelo aumento de eficiência dos sistemas. Uma previsão na evolução do consumo divulgada no relatório de 2013 da Shell intitulado ‘New Lens Scenario – A shift in perspective for a world in transition’ mostrada na figura 1 evidencia um cenário de crescimento das energias renováveis com boas perspectivas, porém percebe-se ainda nesta projeção que em 2060 mais de 50 % do consumo ainda será proveniente de fontes como petróleo, gás natural e carvão.

Figura 1 - Previsão do consumo de energia até 2060.

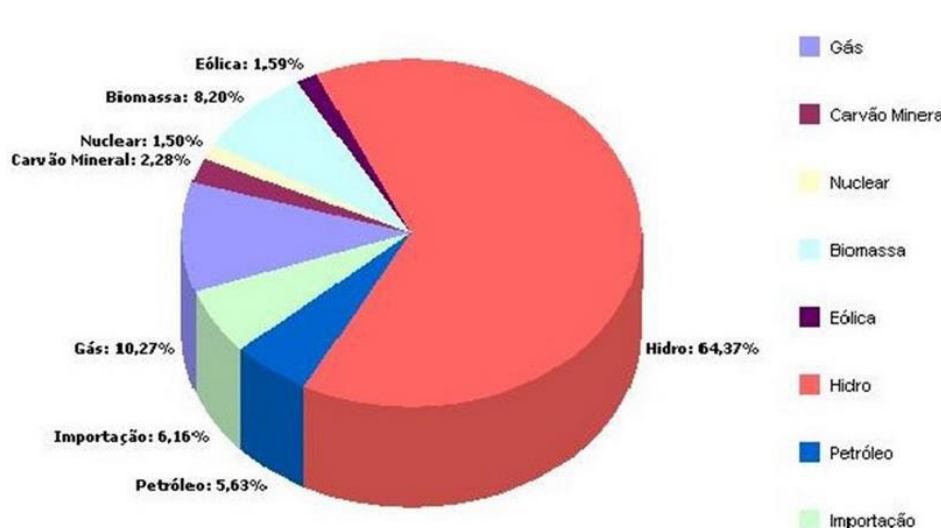


Fonte: (SHELL, 2013)

1.2.1. A matriz energética no Brasil.

Mais da metade do fornecimento energético do Brasil ocorre através das hidroelétricas. Dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) mostram que em 2013 a energia proveniente de hidroelétricas corresponde a quase 65% do total (figura 2), mesmo sendo uma energia renovável, existem recomendações no sentido de uma maior diversificação da matriz energética. Além dos impactos causados de forma localizada pelas hidroelétricas, em tempos de crise hídrica, com a queda do nível dos reservatórios, ocorrem aumentos consideráveis na tarifa de energia a partir do uso das termoeletricas e problemas com a falta de abastecimento. A experiência recente do Brasil ao gerenciar a situação de baixo nível dos reservatórios demonstra a grande importância de uma boa combinação de todas as fontes de geração de energia disponíveis e deixa claro a importância de se levar em conta a complementariedade entre essas fontes. (MELO, 2015).

Figura 2 - Matriz energética brasileira em 2013



Fonte: (ANEEL, 2013)

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) o Brasil é o 5º maior investidor em energias renováveis do mundo, apesar disso, conforme documento emitido pela *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)*, no Brasil os investimentos em energias renováveis subiram abaixo da média mundial em 2011, crescendo apenas 8% em relação aos 17% de crescimento na esfera mundial.

De uma forma geral, em comparação a outros países do globo, a matriz energética brasileira se destaca no uso de fontes renováveis, o que torna o país mais seguro em crises

afetadas pelo elevado preço do petróleo. Mesmo assim, o país, por ter dimensões continentais e uma localização privilegiada geograficamente, possui um enorme potencial renovável a ser aproveitado.

1.3. A Energia Solar

A energia do Sol é responsável por diversos fenômenos que mantêm os sistemas vitais do planeta e fonte praticamente da maioria dos tipos de energia disponíveis ao uso do homem, desde a formação dos ventos aos processos que originam os combustíveis fósseis. Portanto, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar representa uma fonte inesgotável de energia.

O termo *radiação solar* é utilizado de forma genérica e é utilizado em termos de fluxo de potência. A *irradiação solar* se refere a energia disponibilizada por unidade de área. Existem diversas unidades que representam esses termos, as mais utilizadas são MJ/m²dia e kWh/m²dia para a radiação e W/m² para a irradiação solar. A irradiação solar que atinge a terra, no topo da atmosfera tem um valor médio de 1367 W/m² (constante solar), com mínimo de aproximadamente 1322 W/m² no afélio e 1412 W/m² no periélio. Considerando o raio médio da Terra de 6371 Km e a constante solar de 1367 W/m², conclui-se que a potência disponibilizada pelo Sol, no topo da atmosfera terrestre gira em torno de 174 mil TW. (CRESESB, 2014)

Segundo Trenberth, 2009, da irradiação total que atinge a Terra, 46 % é absorvida ou refletida pela atmosfera; dos 54% restantes, 7% é refletida e 47% é absorvida pela superfície terrestre, sendo assim, do total de 174 mil TW disponibilizados no topo da atmosfera, cerca de 94 mil TW chegam efetivamente na superfície terrestre. Levando em consideração esse valor, em apenas 1,7 h a energia solar disponibilizada na superfície terrestre é equivalente ao consumo mundial de energia primária do ano de 2012 que foi de 155.505 TWh.

Atualmente existe uma forte tendência ao uso da energia solar em diversas finalidades, a energia solar pode ser aplicada no aquecimento de água, secagem e cozimento de alimentos etc. Uma das aplicações de mais destaque é realizada através da conversão em energia elétrica através do uso de placas fotovoltaicas.

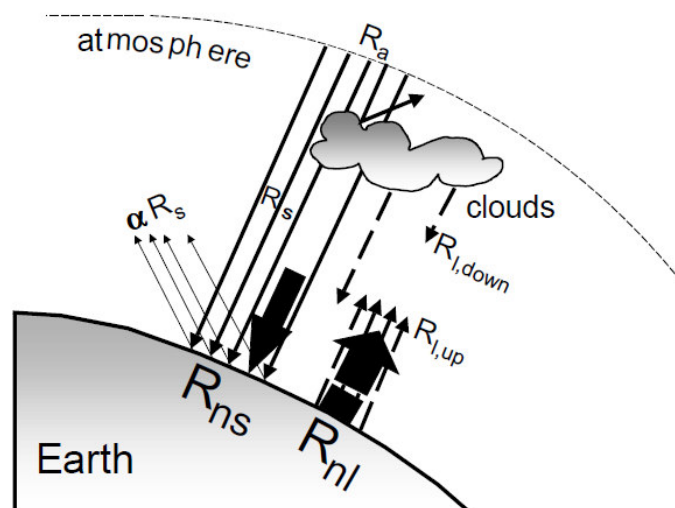
1.3.1. Conceitos de radiação

A radiação solar global (R_s) é a parcela de radiação que atinge um plano horizontal na superfície terrestre. É composta pela radiação direta e a radiação difusa proveniente do espalhamento causado na atmosfera. A radiação solar extraterrestre (R_a) representa a radiação no topo da atmosfera.

O Albedo (α) é caracterizado como a parcela de radiação que é refletida após atingir a superfície terrestre. Depende do tipo de superfície e do ângulo de incidência. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) o seu valor tem grande variabilidade a depender da superfície. Para a superfície padrão o seu valor é de 0,23, a superfície padrão se baseia em uma cultura hipotética de grama ou alfafa, assumindo uma altura de 0,12 m e 0,30 m, respectivamente, ambas sem restrição de água e nutrientes. Ainda segundo a FAO 56, a radiação de onda curta (R_{ns}) é caracterizado como sendo a fração da radiação solar global (R_s) que não é refletida na superfície. O seu valor é de $(1-\alpha) R_s$, sendo α o valor do ângulo de reflexão. O R_{nl} ou radiação de onda longa é a parcela de radiação que é perdida na forma de emissão após a absorção na superfície terrestre.

A figura 3 mostra os processos envolvendo a radiação solar e a superfície terrestre.

Figura 3 - Componentes de radiação ao atingir a Terra



Fonte: (ALLEN et al, 1998).

1.3.2. Medição da radiação

A medição da radiação solar global (R_s) na superfície terrestre tem fundamental importância para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas, como

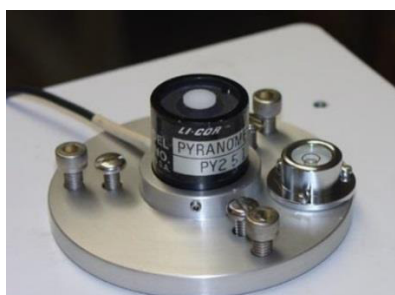
também para o desenvolvimento de projetos que visam a captação e a conversão da energia solar. Com dados de série histórica dessas medidas, é possível viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano. (CRESESB, 2014)

Assim, o conhecimento do recurso solar é de suma importância, sendo a radiação solar global a variável de maior peso no desenvolvimento de um projeto de sistema de captação de energia solar. O objetivo do instrumental é o de medir o fluxo de energia solar através da radiação instantânea ou temporal (min/dia/ano). Para isso os dados de radiação podem ser mensurados diretamente ou estimados através de modelos matemáticos.

1.3.3. Principais instrumentos de medição

O piranômetro é o instrumento que mede a irradiação (W/m^2) total, direta e difusa, num plano horizontal. Os dados coletados com esse instrumento são os mais utilizados em simulações e cálculos da energia recebida por coletores solares. Existem três tipos mais comuns: fotocondutivos, bolométricos e fotoelétricos. Existem diferentes modelos de piranômetros com termopilha, mas de forma geral a radiação incidente é medida através de um diferencial de potencial que é obtido pela diferença de temperatura de dois materiais: um com elevada absorvância e o outro com elevada refletância. Os sinais emitidos são detectados por um potenciômetro. (DUFFIE; BECKMAN, 1991). A Figura 4 apresenta um modelo desse tipo.

Figura 4 - Piranômetro fotovoltaico LiCor



Fonte: (PRADO, 2007).

O heliógrafo é o instrumento usado para medir a duração diária de brilho solar ou insolação. O heliógrafo mais usado é o de Campbell-Stokes (figura 5), que é formado por uma esfera de vidro transparente, que atua como uma lente convergente, queimando uma

fita de papel (heliograma) através do foco formado pelos raios luminosos. No fim do dia é feita a leitura da fita que informa a insolação (n). (SILVA, 2006)

Figura 5 - Heliógrafo de Campbell Stokes utilizado para medições de insolação.



FONTE: (PRADO, 2007)

O piroheliômetro (figura 6) mede a irradiação (W/m^2) incidente em uma superfície plana perpendicular à incidência da radiação solar. A radiação atinge o sensor no instrumento através de uma abertura que permite apenas a visão equivalente ao disco solar e uma pequena parcela da radiação proveniente do céu próximo ao sol (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

Figura 6 – Piroheliômetro para a medição de radiação perpendicular à superfície.



Fonte: (PRADO, 2007).

1.3.4. Estimativa de radiação

Quando não há disponibilidade de instrumentos específicos de medição ou seus dados não são confiáveis, faz-se necessário a utilização de modelos matemáticos de estimativa da radiação solar. Segundo a FAO, um dos métodos de estimativa mais utilizado é o modelo de Angstrom-Prescott (1940). O modelo faz a estimativa da radiação solar global (R_s) como função da radiação extraterrestre (R_a) e leva em consideração os valores de insolação local

(n). Para a estimativa por este modelo é necessário conhecer os coeficientes a e b , que, quando desconhecidos a FAO sugere o uso de $a=0,25$ e $b=0,50$.

1.3.6. A energia solar fotovoltaica

O fundamento da conversão da energia do Sol em energia elétrica está no efeito fotovoltaico, descoberto por Becquerel em 1839 ao observar que certos materiais, ao ser expostos à luz, eram capazes de produzir uma corrente elétrica (ALONSO, 2011). O efeito fotovoltaico acontece em materiais chamados de semicondutores, que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução). O semicondutor mais usado é o silício, seus átomos possuem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Adicionando-se átomos com cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso que não poderá formar a ligação e que ficará excedente, fracamente ligado a seu átomo de origem. Com a energia térmica, este elétron se livre, é excitado e segue para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n. Ao introduzir átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. A de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, um elétron vizinho pode passar a esta posição, fazendo, neste caso, com que a lacuna se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p. Se a partir do silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção *pn*. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram as lacunas que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo (ALONSO, 2011).

Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n. Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual se denomina de efeito fotovoltaico. Se as duas extremidades da peça de silício forem conectadas por um fio,

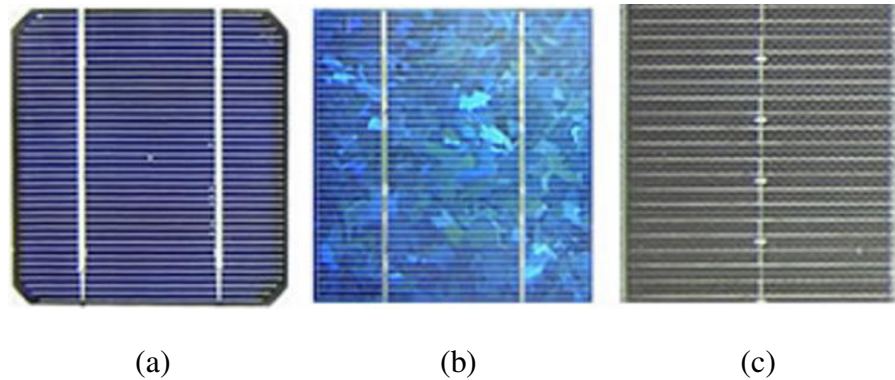
haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (CRESESB, 2007).

Os painéis fotovoltaicos são constituídos pelo conjunto de várias células fotovoltaicas, podendo ser de silício monocristalino, policristalino e amorfo. A célula mais utilizada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade é a de silício policristalino, visto que sua fabricação já é de fácil manipulação, sendo bem conhecida e executada. As células de silício policristalino são mais baratas, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso, entretanto, a eficiência cai em comparação às células de silício monocristalino. O processo de pureza do silício policristalino e a técnica de fabricação da mesma são similares ao do silício monocristalino, mas o que difere esses dois tipos de célula é o rigor de controle na fabricação (SILVA, 2006).

No decorrer dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais. As células de silício amorfo apresentam alto grau de desordem na estrutura dos átomos, sendo essa característica suficiente para diferenciar esse tipo de célula das demais. A sua utilização em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Tem como suas principais características o fato de apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e poder ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos. Apesar dos benefícios apresentados, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício (SILVA, 2006). A figura 7 mostra os três tipos de células fotovoltaicas.

Segundo relatório técnico do Greenpro, de 2004, cada tipo de célula tem a sua sensibilidade espectral, que, a depender do seu material, as células solares são mais ou menos eficientes na conversão de diferentes faixas do espectro eletromagnético em eletricidade. A sensibilidade espectral define a faixa da radiação para a qual a célula funciona de um modo mais eficaz, e influencia a eficiência sob diferentes condições de radiação. A maior parte de energia solar está concentrada na faixa da luz visível que fica entre 400 nm e 800 nm. Enquanto as células solares cristalinas são particularmente sensíveis à radiação solar de onda longa, as células de película fina utilizam melhor a luz visível. As células de silício amorfo podem absorver a radiação de onda curta com maior eficácia.

Figura 7 - Células fotovoltaicas (a) Silício monocristalino (mono-Si) (b) Silício Policristalino (poly-Si) (c) Silício amorfo (a-Si)

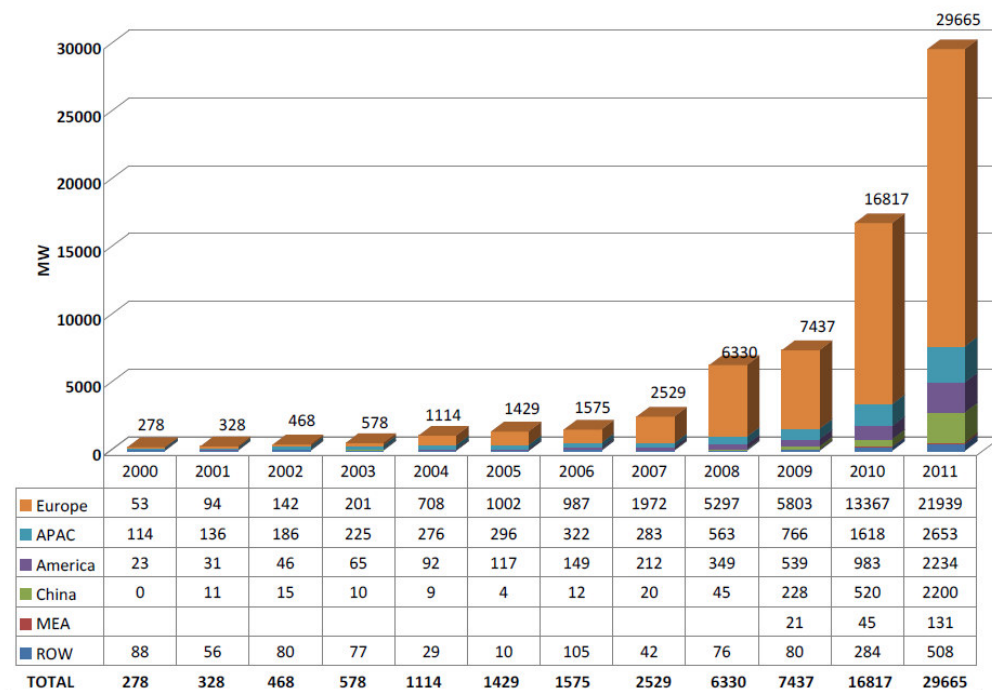


Fonte: (SILVA, 2006).

Os sistemas fotovoltaicos classificam-se em duas categorias, isolados e conectados a rede (off-grid e on-grid, respectivamente). Sistemas isolados necessitam de algum tipo de armazenamento, que pode ser em baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de armazenamento de energia, como no caso do bombeamento fotovoltaico que pode-se armazenar em uma cota elevada na forma de energia potencial. Os sistemas conectados à rede dispensam o uso de acumuladores, pois a energia por eles produzida pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada diretamente da rede convencional, toda a energia excedente produzida é enviada de volta à rede convencional (CRESESB, 2014).

O espetacular crescimento da potência fotovoltaica instalada nos últimos anos superou todas as previsões, inclusive as mais otimistas, demonstrando o potencial desta tecnologia como fonte de energia em todo o mundo. A análise da figura 8 mostra a evolução da capacidade instalada anualmente em diversas regiões do globo.

Figura 8- Evolução da potência instalada anualmente de 2000 a 2011. APAC: Ásia e Pacífico, MEA: Oriente Médio e África, ROW: Resto do Mundo.



Fonte: EPIA. GlobalMarket Outlook for photovoltaics.

Observa-se um aumento considerável ao longo dos anos, demonstrando que a energia solar fotovoltaica está se tornando mais acessível, em parte pela busca da redução dos custos da tecnologia. A figura 8 deixa claro que a energia solar ainda não é bem aproveitada em países com potencial elevado sendo o maior crescimento computado no continente europeu.

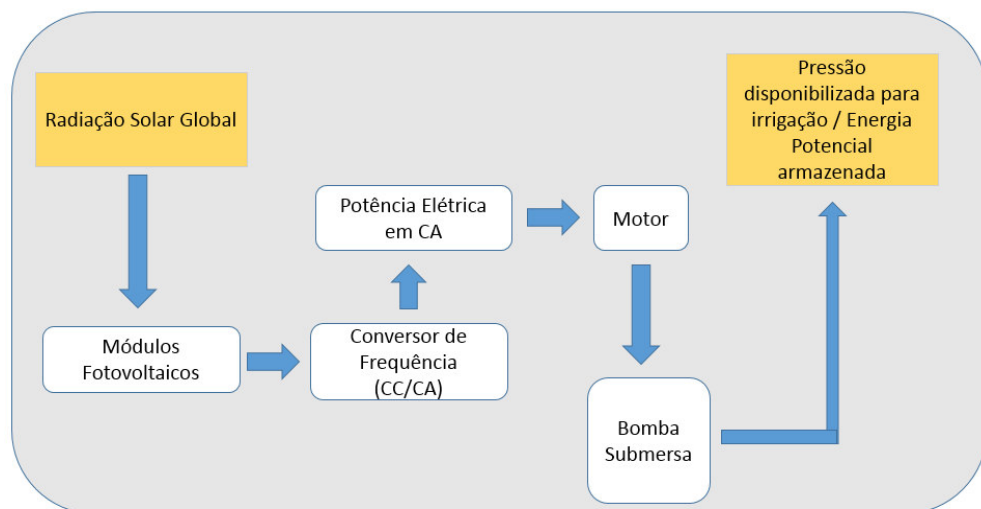
1.4. Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico de Irrigação (SFVI)

Segundo Kolling et al. (2004), um sistema fotovoltaico de bombeamento é diretamente acoplado e possui três componentes principais: um conjunto fotovoltaico, um motor de corrente contínua e uma bomba-d'água. O painel fotovoltaico faz a conversão da energia solar em corrente elétrica que alimenta o motor, que por sua vez é acoplado à bomba d'água. Quando o painel supre o motor com potência elétrica suficiente, ele produz torque mecânico e a bomba começa a trabalhar. Para o acúmulo de energia na forma potencial deve-se armazenar a água bombeada em um reservatório de cota elevada. Segundo Hamidat e Benyoucef (2007), geralmente um sistema de bombeamento funciona sem baterias para armazenamento de energia. O armazenamento da água em reservatórios é a solução mais comumente adotada nas aplicações de bombeamento.

O sistema de bombeamento solar dispensa a rede elétrica e o motor Diesel, produzindo sua própria eletricidade. É eficiente, confiável e necessita de pouca manutenção, uma característica favorável ao uso dessa tecnologia refere-se ao casamento perfeito entre a fonte energética, a radiação solar e a necessidade de água. Geralmente as regiões mais secas e carentes de água são as mais abundantes de insolação e em épocas de maior nebulosidade a necessidade de água normalmente é menor. O gerador solar somente gera energia quando há radiação solar incidindo nas placas. Como comumente não há baterias, a motobomba só funciona durante o dia quando há insolação e não bombeia em períodos excessivamente nublados e chuvosos. A quantidade de água que bombeia depende também da posição do Sol em relação às placas, quando o dia está claro e sem nuvens a vazão bombeada é máxima próximo ao meio dia. Portanto, a quantidade instantânea de água bombeada varia de acordo com o nível de insolação naquele momento (ALVARENGA, 2014).

Ainda segundo Alvarenga, 2014, o gerador solar gera em corrente contínua (CC). Para acionar uma motobomba de corrente alternada (CA) é preciso instalar adicionalmente um inversor de frequência variável, pois a motobomba irá trabalhar com maior ou menor rotação dependendo da quantidade de radiação solar disponível, diferentemente do que ocorre com uma motobomba ligada ao sistema elétrico convencional que tem uma rotação praticamente constante. Diferentes tipos de bombas podem ser utilizados com sistemas fotovoltaicos, sendo as mais utilizadas as bombas volumétricas e as bombas centrífugas. A figura 9 mostra os componentes de um SFVI considerados neste trabalho.

Figura 9- Esquema do sistema fotovoltaico de irrigação.

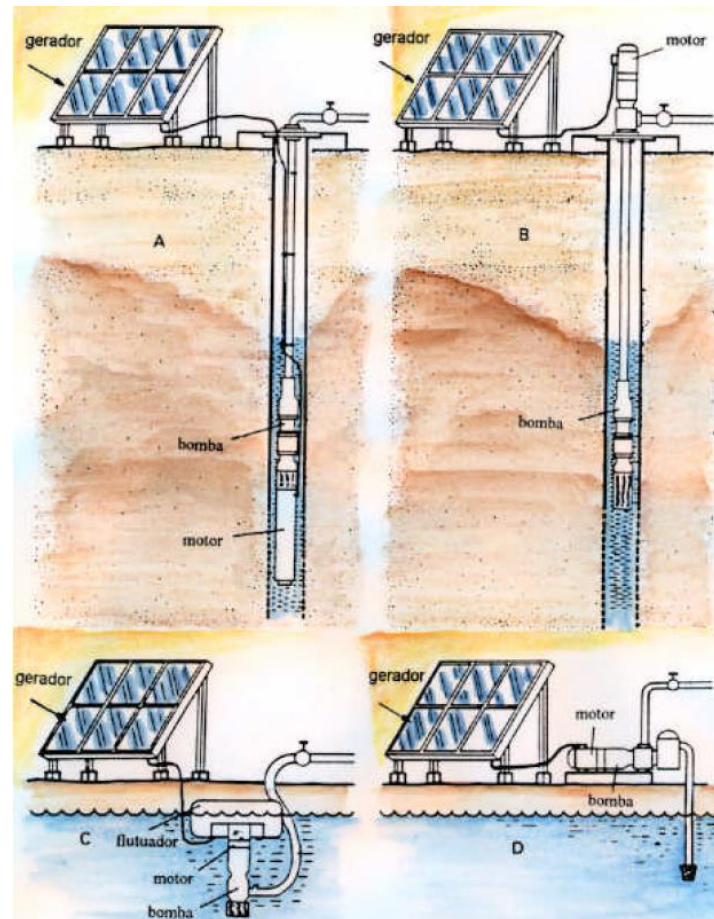


Fonte: Autor

Em sua maioria, encontra-se na literatura referências a sistemas de bombeamentos que já são dedicados à tecnologia fotovoltaica. Uma opção alternativa e mais econômica é a utilização de motobombas centrífugas multiestágios acopladas a conversores de frequência CC/CA. Essa opção já vem sendo utilizada no Brasil e no exterior, além de que, diversos trabalhos (FRANKLIN, 2009; MELO, 2004; BRITO, 2006) atestam sua eficiência e economia frente aos sistemas dedicados.

As configurações utilizadas em sistemas fotovoltaicos podem aparecer em basicamente quatro formas, como mostra a figura 10. Em sequência tem-se grupo motobomba submersa, bomba submersa e motor em superfície, grupo motobomba flutuante e grupo motobomba em superfície (FEDRIZZI, 1997).

Figura 10– Configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico.



Fonte: (FEDRIZZI, 1997)

Da energia total proveniente do Sol, somente uma parcela pode ser utilizada para escoar o fluido na tubulação, em cada etapa de transformação de energia ocorrem perdas, sendo a maior na conversão que ocorre na placa fotovoltaica, de 89 % e de 6,5 % no conjunto motobomba / sistema de distribuição. (FEDRIZZI, 2003).

1.5. O SFVI no Mundo

O bombeamento fotovoltaico somente se deu de forma comercial no final da década de 1970. Até 1990 não mais de 10.000 sistemas haviam sido instalados em todo o mundo. Nas últimas décadas, no entanto, esse número tem aumentado consideravelmente. O último estudo de previsão da expansão realizado pela União Europeia, mostra cifras da ordem de 150.000 sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados até o ano de 2010.

A primeira aplicação da tecnologia que se tem registro data de 1978 na ilha de Córsega, a partir daí surgiram projetos independentes. O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP), com o apoio do Banco Mundial (WB) e participação do *Intermediate Technology Development Group* (ITDG), levou a cabo um projeto piloto que incluía teste e avaliação do funcionamento de sistemas de bombeamento fotovoltaico a campo. Esses projetos concluíram um excelente potencial de uso da tecnologia no meio rural, porém com algumas dificuldades em relação à confiabilidade dos equipamentos e a questão de manutenção. Atualmente existem alguns projetos em andamento neste sentido como o Projeto MEDA financiado pelo governo espanhol que beneficiará vários países no norte da África e encontra-se em fase de elaboração e negociação entre as partes e deverá contar com, pelo menos, 90 kWp de potência instalada em comunidades rurais de baixa renda. Ainda na Espanha o governo de Andaluzia incentivou, mediante esquemas financeiros atrativos, a aquisição de SFVI para irrigação em Olivares, mostrado na figura 11. (FEDRIZZI, 2003).

Figura 11– Sistemas Fotovoltaicos de irrigação Jaén, Espanha.



Fonte: Adaptado de (MORALES, 2011).

Existem diversos projetos instalados ao redor do mundo. Na Argentina, ONGs em parceria com ONGs alemãs, entre 2002 e 2004, instalaram seis SFVI para irrigação em campos de cultivos para a produção de batata, cenoura, milho e outros grãos com capacidades até 65 Wp para irrigação de pequenas áreas. No México em um grande programa de aplicação de energias renováveis, foram instalados 206 SFVI, cada um com potência média de 500 Wp, totalizando uma potência instalada de 101 kWp, após dez anos de operação constatou-se 80% de confiabilidade nos sistemas e um tempo de retorno de investimento 5/6 anos em média (MORALES, 2011). É imprescindível identificar os sucessos e as dificuldades na implantação desta tecnologia com o objetivo melhorar o seu uso e torna-lo cada vez mais atraente.

1.5.1. O SFVI no Brasil

No Brasil já existe o registro de instalações de bombeamento solar, porém as informações do uso para a irrigação ainda são escassas. Existem projetos isolados que foram aplicados principalmente no nordeste do país, através de institutos de pesquisa, ONGs e com o apoio governamental.

No estado da Bahia, entre 2006 e 2008, o Projeto “Adapta Sertão” instalou sete sistemas de irrigação no município de Pintadas para irrigação por gotejamento de hortaliças. Além disso, foi instalado em Capim Grosso nove SFVI, uma parceria entre a *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), o centro de pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia com uma potência instalada de 880 Wp. (COELBA). (FEDRIZZI, 2003).

Existem outros projetos em diversos estados como no Ceará com o apoio da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Governo do Estado (EMATERCE), no Mato-Grosso através da ONG E+CO através da venda financiada de SFVI. Em Minas Gerais, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) instalou 17 SFVI em regiões isoladas e na Paraíba onde alguns sistemas foram instalados pela Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba (EMEPA). No Brasil, em 2003, existiam cerca de 3.260 sistemas implantados e uma potência total de 1.7 MWp e o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) atuando diretamente no incentivo da aplicação do sistema fotovoltaico com certo sucesso apesar de problemas de caráter estrutural do próprio planejamento, das especificações técnicas dos equipamentos, das formas de introdução da tecnologia e da adaptação dos usuários (FEDRIZZI, 2003).

Dos sistemas instalados em território brasileiro, podemos ainda citar o projeto “Águas do Sol” que promoveu irrigação no interior de Pernambuco com instalações de até 150 Wp e vazões máximas de 8 m³/dia, como também projetos realizados no Rio Grande do Norte com potências instaladas de 960 Wp para vazões de até 43 m³/dia (COSTA, 2006).

Percebe-se um grande potencial no uso destes sistemas com a parceria tanto do Estado, de organizações distintas e empresas. Porém para que a aplicação seja bem-sucedida é preciso identificar as reais potencialidades energéticas da região, a adaptação dos usuários e o processo de mantimento dos sistemas por um tempo viável.

1.6. Irrigação

A irrigação é o fornecimento de água ao solo, quando a fornecida pela chuva ou águas subterrâneas não é suficiente, na quantidade e no momento oportuno, visando proporcionar umidade adequada ao despendimento do cultivo. (MORALES, 2011).

A irrigação viabiliza o cultivo de espécies de plantas em locais onde sem sua aplicação seria impossível, como em locais áridos ou em locais onde não existe uma disposição regular de chuvas. Apesar de se constituir em uma técnica que proporciona alcançar a máxima produção, a irrigação não deve ser considerada isoladamente para se garantir o sucesso da produção, deve ser acompanhada com as demais práticas agrícolas. (FERREIRA, 2011).

Segundo informe do Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial de 2008, com o tema “Agricultura para o Desenvolvimento”, a agricultura é uma fonte de sobrevivência de 86 % dos habitantes da zona rural, proporciona emprego a 1,3 bilhões de pequenos agricultores. Dos 5,5 bilhões de habitantes do mundo em desenvolvimento, três bilhões vivem em áreas rurais. Desses habitantes da zona rural, quase 2,5 bilhões vivem em domicílios envolvidos em agricultura e 1,5 bilhões são donos de pequenas propriedades. Sendo assim, a irrigação detém uma importante atuação no desenvolvimento socioeconômico na medida em que garante a produção e redução dos riscos na produção de alimentos, atua como gerador de empregos no campo, ajuda na melhoria da qualidade das culturas e dos produtos e consequentemente gera renda para o agricultor.

Os diversos sistemas de irrigação disponíveis atualmente no mercado dão aos produtores uma moderna tecnologia de produção agrícola que, juntamente com manejo equilibrado da adubação e tratos culturais, reúnem todas as condições para que as plantas possam expressar todo o seu potencial genético de produção. (EMBRAPA, 2010).

Segundo Mello, 2009, os sistemas de irrigação são divididos em três grupos: irrigação por superfície, por aspersão e localizada. A irrigação por superfície compreende os métodos de irrigação nos quais a condução da água do sistema de distribuição (canais e tubulações) até qualquer ponto de infiltração, dentro da parcela a ser irrigada, é feita diretamente sobre a superfície do solo. A irrigação por aspersão é o método de irrigação em que a água é aspergida sobre a superfície do terreno, assemelhando-se a uma chuva, por causa do fracionamento do jato d'água em gotas. A irrigação localizada é o método em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular, com pequena intensidade e alta frequência. A seleção do método correto deve levar em consideração os aspectos técnicos, aliando a eficiência, os custos empregados e acima de tudo a reposição das necessidades hídricas da cultura. Um dos sistemas de irrigação mais eficientes é o sistema de irrigação localizada, pois aperfeiçoa o uso da água e opera com baixas pressões, dessa forma, a demanda total por energia desse sistema é inferior às demais o que torna este método o mais compatível com os Sistemas Fotovoltaicos de Irrigação (SFVI).

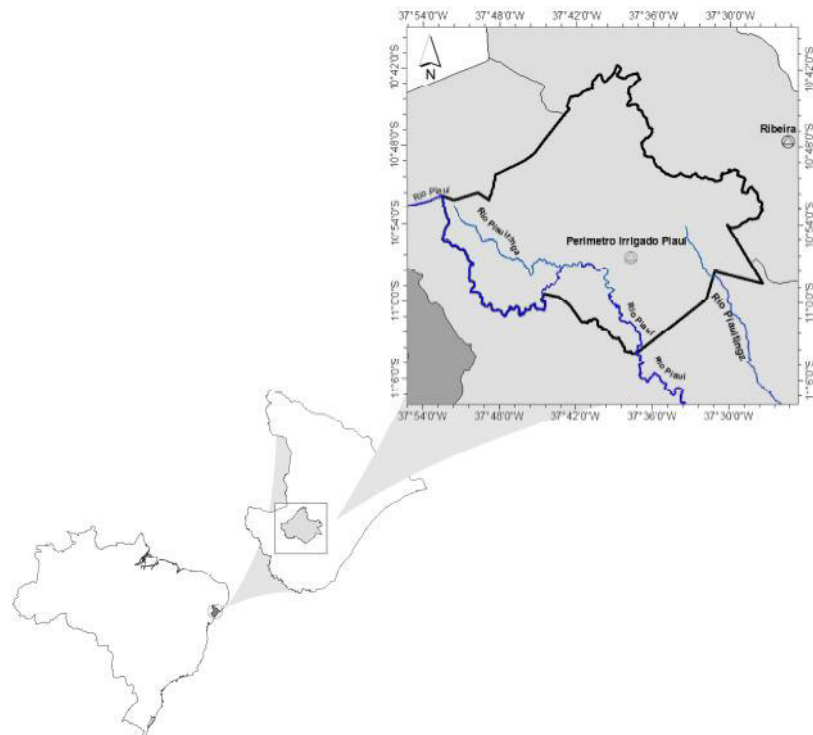
Para um projeto de irrigação, se faz necessário identificar a demanda hídrica da cultura. Para isso deve-se determinar a evapotranspiração. A evapotranspiração é definida como componente do sistema hidrológico e consiste na quantidade de água evaporada no solo e transpirada pelas plantas em uma região, durante um determinado período, depende, portanto, das características climáticas da região e da cultura presente. Quantificada em (mm/dia). A evapotranspiração permite determinar a necessidade hídrica – quantidade de água a ser repostada pela cultura. (ALLEN et al, 1998).

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O perímetro irrigado Piauí está localizado no município de Lagarto (Figura 12), na região centro-sul do estado de Sergipe, distando 69 Km de Aracaju. Está localizado a uma altitude de 183 m com latitude $10^{\circ} 55' 02''$ e longitude $37^{\circ} 39' 00''$.

Figura 12– Perímetro Irrigado Piauí no Estado de Sergipe.



FONTE: (COHIDRO, 2010)

O perímetro é constituído por minifúndios, formado por 539 propriedades, abrangendo uma área de 1.106 hectares. Dessas propriedades, 421 apresentam condições de irrigação, sendo 331 totalmente irrigáveis e 90 parcialmente irrigáveis. Atualmente, existem 236 propriedades que adotam a agricultura com irrigação, somando um total de 415 ha irrigados. Os beneficiários são pequenos produtores e seus familiares, residentes ou não na sua propriedade. O perímetro irrigado Piauí possui uma estação de bombeamento com 14 bombas, cada uma com potência de 75 cv e vazão de 188 m³/h por unidade de bombeamento, que a depender da necessidade podem funcionar até 10 horas por dia (das 06:00 às 16:00). A vazão contínua fornecida por hectare está na faixa de 6,34 m³/h/ha.

A área do perímetro está totalmente contida na bacia do rio Piauí, abrangendo uma superfície da ordem de 1.450 ha, considerando-se as áreas compreendidas pela bacia hidráulica (345 ha) e pelo perímetro irrigado (106 ha) (COHIDRO, 2010).

Segundo a classificação climática de *koppen*, o clima da área é do tipo (As) clima quente, com mês mais frio de temperatura superior a 18 °C, mês mais seco com precipitação inferior a 60 mm e verão seco. Em termos de lâmina média precipitada sobre a área do Piauí, para um período de 63 anos, a precipitação média da região é de 1.020,6 mm/ano, registrando-se a máxima anual de 2.735,0 mm e a mínima anual de 523,1 mm. Analisando-se as informações mensais, observa-se que o período chuvoso compreende os meses de abril até julho, quando ocorre a precipitação de aproximadamente 55 % do total anual. Nos meses de verão, de setembro a fevereiro, as chuvas diminuem sensivelmente, inclusive não se registrando precipitações em determinados anos, no entanto, as precipitações mais intensas acontecem nesses meses. (COHIDRO, 2010). A Tabela 1 mostra valores climatológicos obtidos de uma série histórica de 63 anos.

Tabela 1– Valores climatológicos obtidos a partir de série histórica para o município de Lagarto*

Posto: Lagarto Município: Lagarto Bacia Hidrográfica do Rio Piauí Lat.:10 55' Long.: 37 40' Alt.: 183m Instalado em 1.920 pelo DNOCS Período de observação: 1.920/1.985 ⇒ 63 anos *						Estimativa de Temperaturas Médias Mensais e Anual, Máximas, Mínimas e Compensadas, para a área do subprojeto 140 * : Alt. média da área do subprojeto 656 * : Lat. da área do subprojeto			
MESES	Precip. Média (mm)	% sobre o total	Precip. Máx (mm)	precip. min (mm)	precip. comp 75% (mm)	T. Média ** (C)	T. Máx Mx (C)	T. Min Mn (C)	Varição tb=Mx-Mn (C)
Janeiro	40,2	3,9	151,6	0,0	13	26,0	31,3	21,7	9,6
Fevereiro	56,3	5,5	338,9	0,0	16	25,8	30,1	21,7	8,4
Março	83,4	8,2	419,5	2,5	37	25,4	31,0	21,7	9,3
Abril	129,4	12,7	351,9	20,9	75	25,4	30,0	21,5	8,5
Mai	158,0	15,5	543,9	7,8	94	25,4	28,5	20,7	7,9
Junho	138,6	13,6	319,0	8,2	100	23,3	27,3	19,7	7,7
Julho	137,1	13,4	411,5	32,3	86	22,5	26,7	18,8	7,9
Agosto	84,2	8,3	347,0	0,0	51	22,5	27,1	18,6	8,5
Setembro	57,6	5,6	178,1	0,0	22	23,3	28,2	19,6	8,6
Outubro	42,4	4,2	197,0	0,0	14	24,6	29,9	20,4	9,5
Novembro	48,7	4,8	246,5	0,0	11	25,5	31,1	21,3	9,8
Dezembro	44,7	4,4	254,5	0,0	8	25,8	31,4	21,5	9,9
T O T A L	1020,6	100,0	2735,0	523,1	782	24,6	29,4	20,6	8,8

Fonte: (COHIDRO, 2010)

*Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste - Sergipe, Série Pluviometria - 8, Sudene - 1990. Com falhas de leitura. Valores obtidos por meio de análise estatística.

**Estimativa de temperaturas através da utilização de Equações de Regressão Linear Múltipla. Análise Quantitativa das Temperaturas em Sergipe - Seplan/Inep - 1985.

Figura 13 - Área de cultivo de pimenta no Perímetro Irrigado Piauí.



Fonte: (COHIDRO, 2010)

A agricultura irrigada no município de Lagarto se apresenta como atividade geradora de renda de fundamental importância, principalmente em pequenas propriedades. Na região do perímetro irrigado, as famílias recebem o recurso hídrico através da COHIDRO (Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe), que faz a captação de água de barragem localizada na bacia hidrográfica do rio Piauí. É preciso salientar que o percentual do custo total de produção, referente aos custos de aplicação da irrigação, varia em função das condições locais, clima, cultura, método utilizado, etc. Dentro do custo variável da irrigação, a energia representa a maior parcela e, dependendo do método, poderá chegar a 70% (MELO, 1993). Portanto, é justificado o estudo de formas alternativas de geração de energia para bombeamento no município de Lagarto/SE.

2.2. Estimativa da Radiação Solar Local

Para que seja possível realizar o dimensionamento do SFVI de irrigação é imprescindível que a radiação incidente local seja conhecida. Para o local de estudo não existem instrumentos de medição direta disponíveis, portanto, é preciso obter uma estimativa de radiação global (R_s) utilizando o modelo de estimativa de Angstrom-Prescott:

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

Onde:

R_s : radiação solar global ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$)

R_a : radiação solar extraterrestre ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$)

n : insolação – duração diária do brilho solar (h)

N : duração máxima possível de brilho solar (h)

a : constante de regressão que expressa a fração da radiação extraterrestre a atingir a terra em dias nublados ($n=0$)

$a+b$: fração da radiação a atingir a terra em dias claros ($n=N$)

Para a estimativa por este modelo é necessário possuir, para a região de estudo, os coeficientes de regressão (a e b) da equação de Angstrom. Os coeficientes podem ser obtidos através de dados em série histórica de insolação (n) e radiação solar global (R_s). No município de Lagarto só estão disponíveis os dados de insolação (n), portanto, para esse estudo, os dados de radiação solar global (R_s) e insolação (n) foram obtidos de uma estação automática do INMET localizada em Itabaianinha (figura 14). A estação do INMET em Itabaianinha está localizada a cerca de 20 km de distância e possui altitude semelhante ao município de Lagarto. Após a definição dos valores de a e b da equação de Angstrom, juntamente com as informações locais de insolação (n) foi possível realizar a estimativa da radiação solar global (R_s) em Lagarto.

Figura 14– Estação do INMET localizada em Itabaianinha que forneceu os dados históricos de radiação solar global (R_s) e insolação (n) para a determinação dos coeficientes da equação de Angstrom – Prescott para a região de estudo.



Fonte: INMET

Os dados de insolação (n) em Lagarto foram coletados em estação da COHIDRO através do heliógrafo de Campbell-Stokes, como mostram as figuras 15 e 16.

Figura 15– Estação Agrometeorológica da COHIDRO em Lagarto.



Fonte: Autor.

Figura 16– Heliógrafo do tipo Campbell-Stokes no local de estudo.



Fonte: Autor.

A estação da COHIDRO é uma estação agrometeorológica do tipo convencional e possui os seguintes instrumentos de medição: termógrafo bimetalico, termômetro de máxima e mínima, anemógrafo, higrógrafo, pluviômetro e heliógrafo. A estação do INMET é uma estação do tipo automática, e, através de diversos sensores, coleta as seguintes informações meteorológicas: temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos e radiação solar. Os dados são medidos a cada minuto, integralizados por hora e disponibilizados após o controle de qualidade. Na tabela 2, seguem os dados de referência das duas estações.

Tabela 2– Dados de referência das estações utilizadas.

Local	Posse	Latitude	Longitude	Altitude
Itabaianinha	INMET	-11.273	- 37.795	205 m
Lagarto	COHIDRO	-10,914	-37,669	188 m

O INMET forneceu os dados de radiação solar global (R_s) acumulados de hora em hora e insolação entre 2008-2013. A COHIDRO forneceu valores diários de insolação entre 2004-2014.

2.2.1. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom-Prescott com dados de Itabaianinha.

Para elevar a confiança nos dados de radiação, é recomendado determinar os valores dos coeficientes (a e b) da equação (1).

A partir dos dados fornecidos pelo INMET, para se obter as radiações acumuladas em MJ/m²dia, foi feito o somatório da radiação acumulada horária exemplificadas no apêndice A.

A equação de Angstrom Prescott pode ser reescrita da seguinte forma:

$$K_t = a + b r \quad (2)$$

Em que:

K_t representa o índice de claridade e é dado por:

$$K_t = R_s/R_a \quad (3)$$

Em que:

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4)$$

Onde:

R_a : radiação solar extraterrestre (MJm⁻²dia⁻¹)

G_{sc} : constante solar = 0,0820 (MJm⁻²min⁻¹)

d_r : distância relativa Terra-Sol

φ : latitude (rad)

δ : declinação solar (rad)

A distância relativa Terra-Sol (d_r) e a declinação solar (δ) é dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (5)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (6)$$

Em que:

J é o dia juliano entre 1 e 365. O ângulo horário solar (ω_s) é dado por:

$$\omega_s = \arccos [-\tan (\varphi) \tan (\delta)] \quad (7)$$

Em que:

r representa a razão de insolação e é dada por:

$$r = n/N \quad (8)$$

Em que:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (9)$$

Foram utilizados os dados da série histórica de 6 anos do INMET compreendidos entre 2008 e 2013. Os quatro primeiros anos (2008-2011) para a determinação dos coeficientes a e b . Encontrou-se os coeficientes para três situações distintas: **a) partição geral:** utilizando todos os dias com dados disponíveis da série histórica, ou seja, entre 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2011; **b) partição mensal:** os coeficientes foram encontrados para cada mês separadamente; **c) partição por estação seca/chuvosa:** os coeficientes foram encontrados para cada estação separadamente, sendo a estação seca compreendida entre setembro e fevereiro e a estação chuvosa compreendida entre março e agosto. Foi utilizado ainda os coeficientes sugeridos pela FAO ($a = 0,25$ e $b = 0,50$) para efeito comparativo. Os coeficientes foram encontrados através da regressão linear entre as duas razões, sendo a razão de insolação no eixo das abcissas (r) e o índice de claridade (k_t) no eixo das ordenadas.

Os dados dos dois últimos anos (2012 e 2013) foram usados para a validação dos modelos com um comparativo entre radiação observada e estimada. O desempenho do método de estimativa em função do tipo de partição foi avaliado correlacionando-se os dados medidos com os estimados, através de uma regressão linear em que se consideraram os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de correlação “r” (precisão), índice de Willmott “d” (exatidão) e índice “c” (confiança ou desempenho). O índice de Willmott está

relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de zero para nenhuma concordância à 1 para a concordância perfeita. Conforme Wilmott (1981) o índice “d” é dado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (10)$$

Onde:

P_i : valor estimado

O_i : o valor observado

O : média dos valores observados.

O coeficiente de correlação é definido pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{N}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n X_i]^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n Y_i]^2}{n} \right]}} \quad (11)$$

Onde:

r : o coeficiente de correlação;

X_i : Radiação Solar medida;

Y_i : radiação solar estimada pelas partições escolhidas.

Para a avaliação do desempenho das estimativas pelas variadas partições escolhidas foi utilizado o índice “c” proposto por Camargo & Sentelhas (1997) para indicar o desempenho dos métodos que reúne os coeficientes de correlação (r) e o de concordância (d) conforme equação 12 e Tabela 3:

$$c = r \times d \quad (12)$$

Onde:

c : índice de “c” de desempenho;

d : índice de concordância, adimensional, variando de 0 a 1;

r : coeficiente de determinação.

Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa pelo índice “c” Camargo & Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Além do índice de desempenho utilizou-se o erro médio (EM), a média dos erros absolutos ($|\Delta|$ %) e o coeficiente de determinação (R^2). Quanto menor o valor absoluto de EM melhor a estimativa, porém valores positivos indicam a quantidade média de superestimativa dos modelos, e negativos, o contrário.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ei - Oi) \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - O)^2} \right] \quad (14)$$

Onde: E_i : Valor da estimativa.

O_i : Valor observado.

2.2.2. Cálculo da estimativa de radiação solar global em Lagarto.

Com a melhor partição escolhida e coeficientes determinados, o cálculo da estimativa foi realizado em Excel utilizando-se a equação de Angstrom Prescott. O cálculo forneceu os valores diários de radiação solar global (R_s). Os dados de entrada são a latitude local, dia

juliano (J) e insolação diária (n) obtidos pelo heliógrafo na estação da COHIDRO em Lagarto. Com os valores calculados foi possível obter as médias mensais, identificar os meses de maior e menor índice de radiação para a série histórica disponível.

Levando em consideração que os dados obtidos na estimativa de radiação corresponderão à radiação incidente em uma superfície horizontal, para a correta estimativa de produção de energia, foi necessário identificar a radiação incidente em um plano de orientação do ângulo ótimo, igual à latitude local. Para isso foi utilizado o software *Radiasol 2.0*, software de acesso livre disponibilizado pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

2.3. Demanda Hídrica para Irrigação

Segundo a FAO, para irrigação do tipo localizada, é necessário estimar a evapotranspiração da cultura ajustada (ET_{c-aj}).

$$ET_{c-aj} = ET_0 \times K_c \times K_s \times K_l \quad (15)$$

Onde:

ET_{c-aj} : evapotranspiração da cultura ajustada (mm/dia).

ET_0 : evapotranspiração de referência (mm/dia).

K_c : coeficiente de cultura (adimensional)

K_s : coeficiente de estresse hídrico. (adimensional)

K_l : coeficiente de localização. (adimensional)

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada pela equação de Penman – Monteith padrão FAO 56 (ALLEN et al., 1998). A equação é apresentada da seguinte forma:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (es-ea)}{\Delta + \gamma(1+0,34 U_2)} \quad (16)$$

Onde:

ET_0 : Evapotranspiração de referência (mm/dia)

Δ : inclinação da curva de vapor de saturação (kPa/°C)

R_n : saldo de radiação na superfície (MJ/m²dia)

G : fluxo de calor no solo (MJ/m²dia)

γ : constante psicométrica (kPa/°C)

T : temperatura do ar medida a dois metros de altura (°C)

U_2 : velocidade do vento medida a dois metros de altura (m/s)

e_s : pressão de saturação do vapor d'água (kPa)

e_a : pressão de vapor d'água atual (kPa)

A equação acima utiliza dados climáticos de radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento.

O coeficiente de cultura K_c utilizado levou em consideração as culturas que detém a maior produção no perímetro (aimpim, batata doce, mandioca, maracujá, pimenta malagueta, quiabo e tomate). O valor de K_c variou, na maior demanda, entre 1,0 e 1,15 para o quiabo e batata-doce, respectivamente.

O coeficiente de estresse hídrico (K_s) promove o ajuste da evapotranspiração potencial para a evapotranspiração real da cultura em função do nível de umidade atual do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento. Para o presente trabalho, o K_s considerado foi de 1 pois, sendo esse o maior valor, representa a condição de maior demanda.

O coeficiente de ajuste específico (K_l) leva em consideração a irrigação localizada e a porcentagem de área sombreada da cultura. A equação utilizada neste trabalho é a proposta por Keller e Kermeli (1975):

$$K_l = P/0,85 \quad (17)$$

Em que:

K_l = coeficiente de localização (adimensional)

P : percentagem de área sombreada em decimal.

Neste trabalho foi considerado um valor estimado de 80 % de área sombreada no estágio fenológico de maior demanda.

2.4. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico de bombeamento consiste em definir a potência de pico do gerador fotovoltaico, selecionar a motobomba e área requerida da placa fotovoltaica. Para isso é necessário conhecer primordialmente as necessidades de água, as alturas manométricas envolvidas e as características de radiação solar local.

Após a obtenção dos dados de demanda hídrica, o dimensionamento do sistema de bombeamento proposto consiste em determinar as especificações e o tamanho do sistema que irá satisfazer a demanda. O sistema é dimensionado a partir de parâmetros de referência. Devem-se utilizar as equações a seguir (CRESESB, 2014):

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot AMT \quad (18)$$

Onde:

E_H : Energia Hidráulica Diária (Wh/dia)

Q_d : Volume diário (m^3 /dia)

O volume diário (Q_d) foi obtido considerando a evapotranspiração da cultura ajustada de maior demanda ($ET_{c-aj.}$)

AMT : Altura manométrica total (m ou m.c.a)

A altura manométrica total corresponde à energia em forma de pressão para elevar o fluido bombeado, ela leva em consideração a altura geométrica de elevação e as perdas de cargas totais do sistema que corresponde ao somatório das perdas na tubulação (rugosidade interna da tubulação) e as perdas por acidentes (curvas, juntas, válvulas, etc.). A altura manométrica é dada por:

$$AMT = H_v + h_f + h_e \quad (19)$$

Onde:

H_v : altura vertical (m)

h_f : perda de carga na tubulação (m)

h_e : perda de carga por acidentes (m)

A altura vertical (H_v) corresponde ao somatório da altura de sucção (H_s) e altura de recalque (H_R).

$$H_v = H_s + H_R \quad (20)$$

A perda de carga na tubulação (h_f) pode ser calculada através da equação (21), ela leva em consideração as perdas de energia que ocorrem entre o fluido e a parede interna da tubulação. O fator de atrito (f) é obtido através do diagrama de *Moody*, o mesmo é obtido através da rugosidade do material da tubulação e do número de Reynolds, que é um fator adimensional que determina o regime do escoamento (laminar ou turbulento).

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (21)$$

Onde:

f : coeficiente de atrito

L : comprimento da tubulação (m)

D : diâmetro interno da tubulação (m)

V : velocidade média do fluido (m/s)

g : aceleração da gravidade (m/s²)

O valor 2,725 da equação (18) representa a constante hidráulica (C_h)

$$C_h = \frac{\rho g}{3600} \quad (22)$$

Onde:

ρ : massa específica da água (Kg/m³)

g : aceleração da gravidade (m/s²)

$$L = \frac{E_H}{\eta_{motobomba}} \quad (23)$$

Onde:

L : Carga diária do sistema (Wh/dia)

$\eta_{motobomba}$: eficiência diária do conjunto moto-bomba.

$$P_{(Wp)} = 1,25 \cdot \frac{L}{(HSP)_\beta} \quad (24)$$

Onde:

$P_{(Wp)}$: Potência-pico da instalação (Wp)

O $(HSP)_\beta$ ou horas de Sol pleno é equivalente à energia total diária incidente sobre o gerador fotovoltaico ou radiação solar global em kWh/m². O valor considerado foi o estimado neste trabalho.

Por fim, foram gerados gráficos práticos de dimensionamento que informam a potência instalada em Wp em função da área irrigada e da altura manométrica em intervalos de 5 m.c.a numa faixa de 5 a 60 m.c.a.

2.5. Análise Comparativa

A análise comparativa relacionará o sistema fotovoltaico de irrigação (SFVI) com o sistema de abastecimento convencional utilizado no perímetro, que consiste em uma estação de bombeamento central. O SFVI em si tem características de um elevado investimento inicial, com baixa necessidade de manutenção e operação relativamente fácil.

Para a análise comparativa entre o uso do sistema fotovoltaico e o atual utilizado do perímetro levou-se em consideração os principais itens para os dois tipos de instalação, sua vida útil e os custos de manutenção. Os custos de manutenção podem variar a depender das condições locais, instalação e uso diário. Em Melendéz, 2009 esses valores correspondem de 1 a 3% do investimento inicial. Para este trabalho, utilizou-se o valor de 2% do investimento inicial.

Para o sistema fotovoltaico contabilizou-se os custos dos módulos fotovoltaicos, bomba, conversor de frequência, manutenção e reposição dos equipamentos de acordo com sua vida útil. Para o sistema convencional foram contabilizados os custos relativos às bombas, tarifa de energia, manutenção e reposição dos equipamentos. O custo total foi dividido pelo lote padrão de 0,5 ha. Para se analisar a comparação e os custos de reposição das bombas, foi considerada uma vida útil de 30 anos para o módulo fotovoltaico e de 10 anos para os demais equipamentos, conforme fabricantes.

Segue abaixo, em detalhes, os parâmetros e valores que foram considerados no custo final das opções.

Preço do sistema motobomba: O preço do sistema motobomba depende estritamente do volume e pressão desejados, não ocorrendo de forma linear, mas seguindo as curvas fornecidas pelos fabricantes para a escolha do modelo mais adequado. Para o sistema convencional atualmente vigente no perímetro, que é composto por 14 bombas centrífugas de 75 cv, cada bomba possui um valor aproximado de R\$ 35.000,00. Para o SFVI, as bombas variam entre R\$ 450,00 e R\$ 2200,00* .

Preço dos módulos fotovoltaicos: O preço do gerador fotovoltaico é dado em (R\$/Wp) e apresenta variações consideráveis dependentes do mercado. Os dados mais recentes foram publicados pela IDEAL (Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina) no relatório “O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica – Edição 2015”. O relatório traz resultados de pesquisas feitas com empresas que comercializam a tecnologia fotovoltaica, com destaque para os módulos de silício policristalino. No Brasil os valores são variáveis e flutuam entre R\$ 5,9/Wp e R\$ 15/Wp, no

* cotações em www.brasilbombas.com.br; www.somar.com.br; www.agrotama.com.br.

entanto o valor médio encontrado para a região nordeste é de R\$ 7,69/Wp. Em comparação com outros países, o Brasil ainda possui elevados custos para a implantação da tecnologia, por exemplo, na Alemanha o Wp está em torno de R\$ 3,97.

Tarifa elétrica: O valor da tarifa elétrica varia de acordo com a concessionária de energia e classes de energia. Conforme a resolução normativa de nº 414/2010 da ANEEL, o perímetro irrigado Piauí se enquadra na tarifa de serviço público de irrigação rural. No local de estudo a tarifa para esta denominação possui um valor de 0,2652 R\$/kWh**.

Foram analisados e comparados os custos acumulados do sistema fotovoltaico de irrigação (SFVI) e do sistema convencional ao longo do tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos para cada 0,5 ha irrigado conforme as demandas calculadas. Para o SFVI, em específico analisou-se os custos referentes a diferentes alturas manométricas entre 5 e 60 m.c.a, com intervalos de 5 m.c.a.

**Tarifa pesquisada em 03/11/2015 em www.energisa.com.br.

CAPÍTULO 3 - ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 – Coeficientes da Equação de Angstrom Prescott.

Abaixo, seguem os gráficos e dados das regressões gerados para a obtenção dos coeficientes da equação de Angstrom-Prescott.

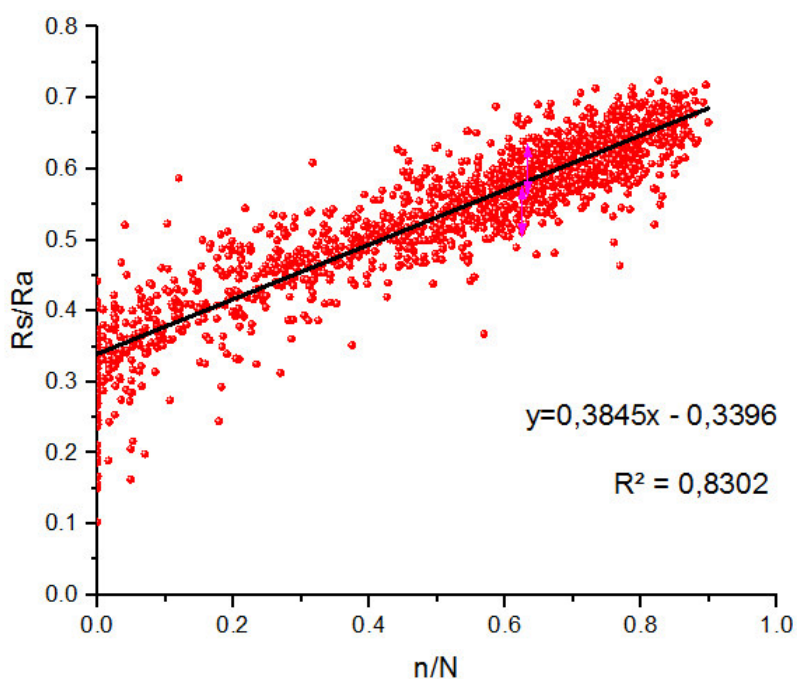
3.1.1. Partição geral

A tabela 4 e a figura 17 mostram os dados referentes à partição geral.

Tabela 4– Dados obtidos para a partição geral.

Partição Geral				
Período	<i>a</i>	<i>b</i>	Equação	R ²
1461 dias	0,34	0,39	$K_t = 0,34 + 0,39 r$	0,845

Figura 17– Regressão linear para a determinação dos coeficientes de Angstrom-Prescott para a partição geral.



3.1.2. Partição mensal

Segue na tabela 5 os coeficientes encontrados para a partição mensal. Os gráficos correspondentes se encontram no apêndice B.

Tabela 5– Dados obtidos para a partição mensal.

Partição Mensal				
Mês	<i>a</i>	<i>b</i>	Equação	R ²
Jan	0,37	0,32	$K_t=0,37 + 0,32 r$	0,829
Fev	0,33	0,39	$K_t=0,33 + 0,39 r$	0,811
Mar	0,34	0,39	$K_t=0,34 + 0,39 r$	0,801
Abr	0,31	0,41	$K_t=0,31 + 0,41 r$	0,861
Mai	0,32	0,41	$K_t=0,32 + 0,41 r$	0,818
Jun	0,33	0,41	$K_t=0,33 + 0,41 r$	0,881
Jul	0,34	0,39	$K_t=0,34 + 0,39 r$	0,898
Ago	0,36	0,34	$K_t=0,36 + 0,34 r$	0,821
Set	0,34	0,38	$K_t=0,34 + 0,38 r$	0,860
Out	0,33	0,39	$K_t=0,33 + 0,39 r$	0,811
Nov	0,34	0,41	$K_t=0,34 + 0,41 r$	0,834
Dez	0,31	0,42	$K_t=0,32 + 0,42 r$	0,857

3.1.3. Partição por estação seca e chuvosa

Segue na tabela 6 os coeficientes encontrados para a partição por estação seca/chuvosa.

Os gráficos correspondentes se encontram no apêndice B.

Tabela 6– Dados obtidos para a partição por estação seca/chuvosa.

Partição por estação seca/chuvosa				
Período	<i>a</i>	<i>b</i>	Equação	R ²
Seco (Set-Fev)	0,34	0,39	$K_t=0,34 + 0,39 r$	0,829
Chuvoso (Mar-Ago)	0,33	0,39	$K_t=0,33 + 0,39 r$	0,844

Para a partição geral foram considerados 1461 pontos, resultando em um coeficiente a de 0,34 e b de 0,39. Em todas as partições foram encontrados valores de R^2 iguais ou superiores a 0,80, com uma variação entre 0,801 e 0,898. Para a partição mensal os valores do coeficiente a variaram entre 0,31 e 0,37 e de b entre 0,32 e 0,42. Na partição por estação seca/chuvosa os coeficientes do período seco foram iguais ao da partição geral, no período chuvoso os valores foram 0,33 para a e 0,39 para b . O índice de claridade variou entre 15% e 74%, em maio e dezembro, respectivamente.

Em relação ao R^2 , percebe-se uma tendência no ajuste linear. Em comparação com outros trabalhos que avaliaram a mesma regressão a partição geral tem-se em (DORNELAS et al. 2006) um valor de R^2 de 0,810 na determinação dos coeficientes para Brasília/DF; em (DALLACORT et al 2004) um valor de R^2 de 0,839 para Palotina/PR e em (CARVALHO et al 2011) um valor de 0,820 para Seropédica/RJ. Neste trabalho o R^2 encontrado para o mesmo tipo de partição foi de 0,845.

Em (TIBA, 2000) foram encontrados os coeficientes da equação de Angstrom Prescott para o município de Propriá/SE, os valores encontrados foram de 0,31 e 0,44 para a e b respectivamente. Os valores são próximos aos encontrados neste trabalho considerando o intervalo de valores de a e b para a partição mensal, para a partição geral os valores apresentam uma ligeira diferença. É preciso levar em consideração as influências geográficas, como a diferença de altitude (Lagarto – 188 m; Propriá – 35 m) e o fato de que Propriá é um município banhado pelo Rio São Francisco.

3.1.4. Comparativo entre valores estimados e observados

O comparativo entre os valores estimados e observados foi feito a partir dos dados dos anos 2012 e 2013, sendo que para cada partição foi construído um gráfico de dispersão forçado na origem (radiação estimada x radiação medida ou observada) e uma tabela com as médias mensais reais e estimadas, além do erro médio absoluto em %.

A figura 18 e a tabela 7 mostram o comparativo entre valores estimados e medidos para a partição geral.

Figura 18 -Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes encontrados pela partição geral.

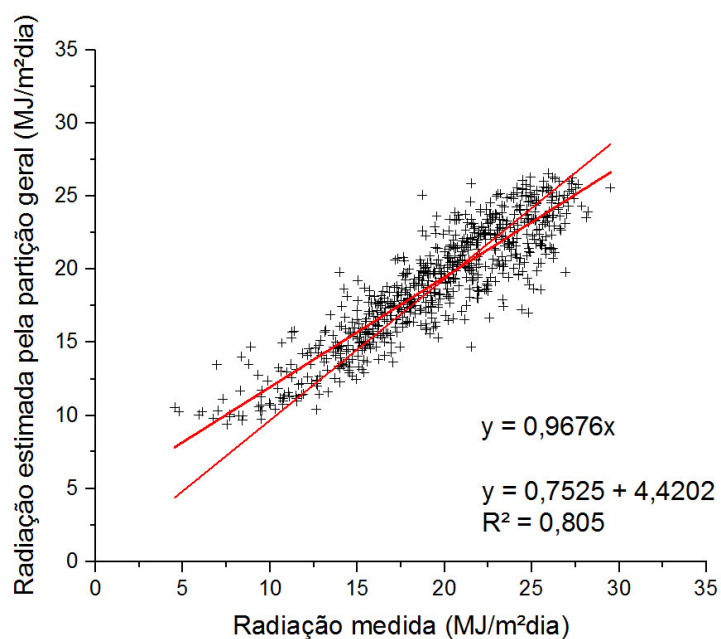


Tabela 7 - Médias mensais reais (RG_{real}), estimadas (RG_{est}) e erro absoluto para a partição geral.

Mês	Nº dias	RG _{real} (MJ/m²)	RG _{est} (MJ/m²)	Δ (%)
JAN	62	22,44	21,44	4,48
FEV	57	21,96	22,49	2,41
MAR	62	22,06	21,55	2,29
ABR	60	18,85	19,22	1,99
MAI	62	15,18	15,96	5,14
JUN	60	14,90	15,29	2,62
JUL	62	14,85	15,49	4,28
AGO	62	17,30	17,30	0
SET	60	19,72	18,75	4,94
OUT	62	21,09	19,77	6,28
NOV	60	21,73	20,09	7,55
DEZ	62	22,51	20,96	6,90

A figura 19 e a tabela 8 mostram o comparativo entre valores estimados e medidos para a partição mensal.

Figura 19- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados (RG_{est}) e os valores de radiação solar observados (RG_{real}) com os coeficientes encontrados pela partição mensal.

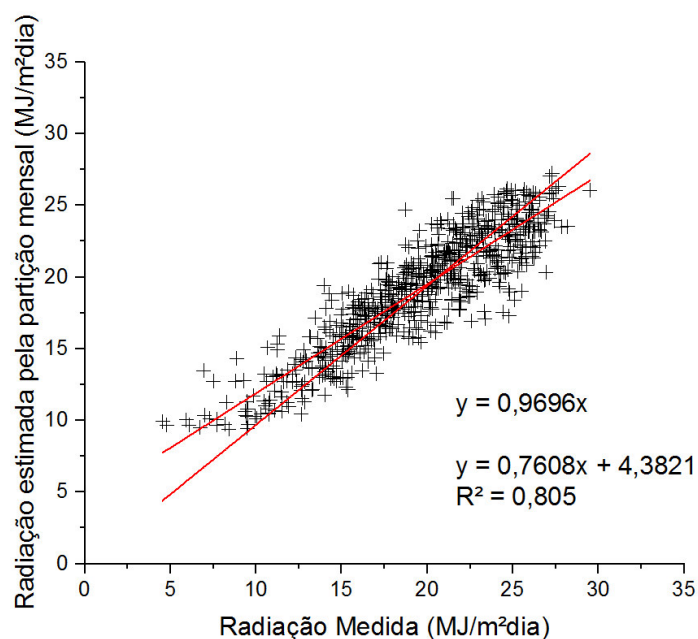


Tabela 8–Médias mensais reais (RG_{real}), estimadas (RG_{est}) e erro absoluto para a partição mensal.

Mês	Nº dias	RG_{obs} (MJ/m²)	RG_{est} (MJ/m²)	($ \Delta $) (%)
JAN	62	22,44	21,38	4,72
FEV	57	21,96	22,09	0,61
MAR	62	22,06	22,09	0,16
ABR	60	18,85	18,81	0,21
MAI	62	15,19	15,94	5,00
JUN	60	14,90	15,44	3,66
JUL	62	14,85	15,63	5,29
AGO	62	17,31	17,31	0,03
SET	60	19,73	18,75	4,94
OUT	62	21,09	19,76	6,33
NOV	60	21,73	20,62	5,13
DEZ	62	22,52	20,96	6,90

A figura 20 e a tabela 9 mostram o comparativo entre valores estimados e medidos para a partição por estação seca/chuvosa.

Figura 20- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes encontrados pela partição por estação seca/chuvosa.

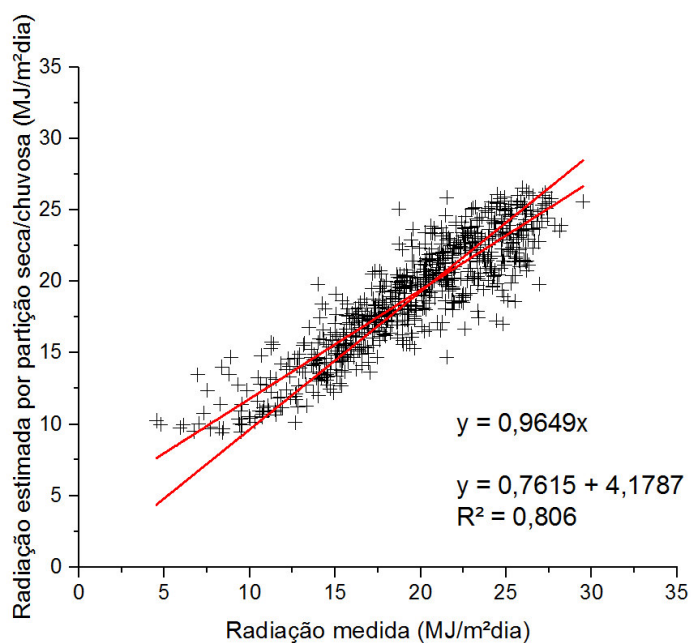


Tabela 9 –Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição por estação seca/chuvosa.

Mês	Nº dias	RGreal (MJ/m²)	RGest (MJ/m²)	\Delta (%)
JAN	62	22,44	21,44	4,48
FEV	57	21,96	22,49	2,41
MAR	62	22,06	21,71	2,29
ABR	60	18,85	19,08	1,22
MAI	62	15,18	15,81	4,15
JUN	60	14,90	15,15	1,67
JUL	62	14,85	15,33	3,23
AGO	62	17,30	17,14	0,92
SET	60	19,72	18,75	4,94
OUT	62	21,09	19,77	6,28
NOV	60	21,73	20,09	7,55
DEZ	62	22,51	20,96	6,90

A figura 21 e a tabela 10 mostram o comparativo entre valores estimados e medidos utilizando o coeficiente FAO.

Figura 21- Gráfico de dispersão forçado na origem com os valores de radiação solar estimados e os valores de radiação solar observados com os coeficientes da FAO.

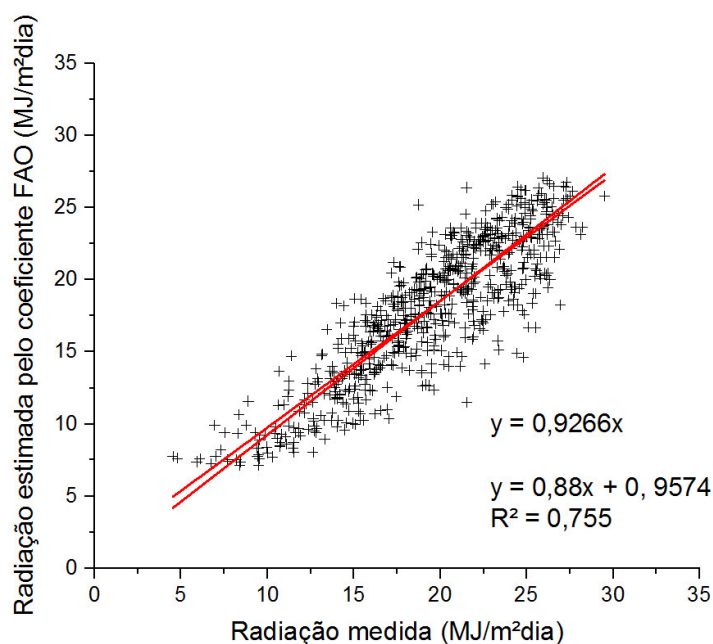


Tabela 10 - Médias mensais reais (RGreal), estimadas (RGest) e erro absoluto para a partição utilizando os coeficientes FAO.

Mês	Nº dias	RGreal (MJ/m²)	RGest (MJ/m²)	Δ (%)
JAN	62	22,44	20,34	9,34
FEV	57	21,96	21,69	1,23
MAR	62	22,06	21,35	3,22
ABR	60	18,85	18,58	1,41
MAI	62	15,18	14,97	1,38
JUN	60	14,9	14,46	2,95
JUL	62	14,85	14,54	2,05
AGO	62	17,30	16,32	5,69
SET	60	19,72	17,52	11,18
OUT	62	21,09	18,41	12,73
NOV	60	21,73	18,63	14,27
DEZ	62	22,5	19,765	12,20

A análise qualitativa visual dos gráficos comparativos entre radiação medida e estimada demonstraram que para todas as partições os valores encontrados foram subestimados em relação às medições reais. Para a partição geral a subestimativa foi de 3,24 %, na partição mensal, de 3,04 %, na partição por estação seca/chuvosa de 3,54 % e utilizando o método FAO foi observado um valor subestimado em 7,4 %.

3.1.5. Aplicação dos índices estatísticos.

A tabela 11 mostra o resultado do índice de concordância ou índice de Willmot (d), coeficiente de correlação (r) e do índice de confiança e desempenho (c) seguindo o critério de interpretação proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 11– Resultados da aplicação índice de Willmot (d), o coeficiente de correlação (r) e índice de confiança e desempenho (c)

Partição	r	d	c	Desempenho
Geral	0,897	0,937	0,840	Muito bom
Mensal	0,897	0,954	0,856	Muito bom
Período seco/chuvoso	0,898	0,938	0,841	Muito bom
Coeficiente FAO	0,869	0,886	0,769	Muito bom

Além do índice de confiança e desempenho, foi utilizado o erro médio (EM) conforme a tabela 12.

Tabela 12– Resultados da aplicação do erro médio (EM)

Partição	EM (MJ/m ² dia)
Geral	-0,37
Mensal	-0,34
Partição por seca/Chuvosa	-0,44
Coeficiente FAO	-1,37

Em todas as partições o índice de desempenho “c” ficou entre 0,76 e 0,85 considerado como muito bom, no comparativo entre elas têm-se um melhor valor para a partição mensal e pior para a estimativa pelo coeficiente FAO. O índice de concordância “d” indicou a superioridade da estimativa pela partição mensal mostrando que por essa partição a radiação solar estimada apresenta uma concordância de 95%. O EM para as três partições identificou

erros médios inferiores a 1 MJ/m²dia, sendo de - 0,37 MJ/m²dia para a partição geral, -0,34 MJ/m²dia para a partição mensal, -0,44 MJ/m²dia para a partição por estação seca/chuvosa. O maior erro médio encontrado foi de - 1,37 MJ/m²dia utilizando para a estimativa os coeficientes sugeridos pela FAO. O EM também mostrou que em todos os testes, o modelo gera subestimativas em relação aos valores de radiação observados. Sendo assim, os coeficientes encontrados podem ser utilizados para a estimativa de radiação solar global em locais que estejam num raio de 40 km de onde os dados foram coletados (estação de Itabaianinha), desde que, nesses locais existam os dados de insolação (n) disponíveis.

Em (DORNELAS et al. 2006), também foi comparado o índice de desempenho ρ_c para radiações medidas e estimadas pela partição geral, mensal e pelo coeficiente FAO para Brasília, os valores médios encontrados foram 0,787; 0,779 e 0,781 respectivamente. Em Dornelas não se observou grandes diferenças entre os índices de desempenho para as partições, especialmente no índice para a estimativa utilizando-se o coeficiente FAO, que ficou no mesmo nível de aceitação das outras partições. Isto ocorre porque para Brasília os coeficientes encontrados foram de $a = 0,282$ e $b = 0,490$, que são mais próximos aos coeficientes FAO ($a=0,25$ e $b=0,50$). Conclui-se que diferentemente de Lagarto/SE, em Brasília/DF, a radiação solar global pode ser estimada com maior segurança pelos coeficientes sugeridos pela FAO.

3.2. Estimativa da Radiação Solar em Lagarto.

De acordo com os índices estatísticos, para a estimativa da radiação solar global em Lagarto foi utilizado os coeficientes da partição mensal. Com os dados de insolação foi possível extrapolar a estimativa para uma série histórica de dez anos e obter as médias mensais de radiação solar em MJ/m²dia no município, conforme a tabela 13. Os cálculos foram feitos através de uma rotina criada utilizando-se o software Excel, em que se inseriam os dados de entrada: latitude, coeficientes a e b e insolação (n), conforme mostra a figura 22.

Figura 22– Rotina criada para o cálculo da radiação solar global utilizando os coeficientes da partição. Ex: Maio/2010

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR PELO MÉTODO DE ÅNGSTRÖM-PRSCOTT

Douglas Vieira Leite - PRODEMÁ

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fonte: Autor

Tabela 13– Médias mensais da radiação solar global estimada (MJ/m²dia) para a série histórica.

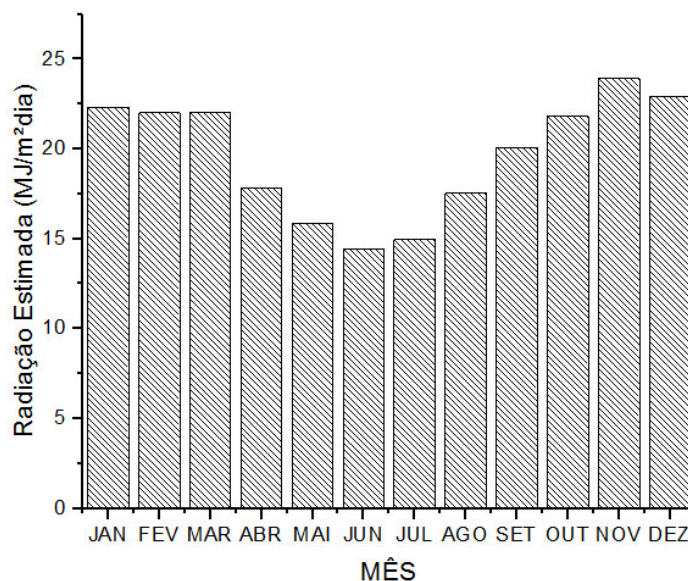
Mês/ Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Jan	19,48	23,19	23,15	23,75	22,97	22,23	21,86	21,7	22,21	21,69	23,4
Fev	21,38	21,01	23,90	23,90	21,68	21,48	20,20	21,69	22,53	23,27	21,04
Mar	21,73	21,98	21,92	21,92	20,84	22,95	21,15	22,46	23,74	22,83	21,13
Abr	17,67	17,02	17,46	17,46	17,50	17,16	17,45	18,22	20,8	18,10	17,29
Mai	17,07	15,89	15,25	15,38	14,30	16,66	17,46	14,53	16,76	16,16	15,3
Jun	12,77	14,14	12,77	12,77	15,44	16,54	12,75	16,18	15,65	15,55	14,34
Jul	14,92	14,71	14,07	14,07	14,84	15,08	15,23	15,57	15,19	15,31	15,64
Ago	17,37	16,93	18,47	18,28	17,01	16,15	16,80	19,05	18,27	16,58	18,1
Set	19,62	21,28	20,53	20,53	19,52	20,73	18,62	19,91	20,7	20,04	19,53
Out	22,89	24,14	21,53	21,76	22,44	21,22	22,01	21,69	21,78	20,87	19,58
Nov	24,50	24,69	23,98	26,08	25,41	25,72	25,51	21,72	23,47	21,1	21,14
Dez	25,32	22,95	23,67	24,23	22,84	22,41	22,58	23,24	21,67	22,63	20,71

Da série histórica seguem as médias gerais mensais (tabela 14 e figura 23)

Tabela 14– Médias de radiação solar global mensais gerais.

Mês	Média (MJ/m²dia)	Média (kWh/m²dia)
Jan	22,33	6,20
Fev	22,01	6,11
Mar	22,06	6,13
Abr	17,83	4,95
Mai	15,89	4,41
Jun	14,45	4,00
Jul	14,97	4,16
Ago	17,55	4,87
Set	20,09	5,58
Out	21,81	6,06
Nov	23,94	6,65
Dez	22,93	6,37

Figura 23– Médias mensais estimadas para a radiação solar global horizontal em Lagarto.



A estimativa demonstra claramente os períodos seco e chuvoso característicos da região. A radiação solar média anual estimada encontrada no plano horizontal em Lagarto foi de 19,66 MJ/m²dia, com o valor mínimo de 14,45 MJ/m²dia no mês de junho e máximo de 23,94 MJ/m²dia em novembro. Dados disponibilizados pela CRESESB, baseado no banco de dados do Centro de Estudos de la Energia Solar (*Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal*) – H world Database, que leva em consideração dados de estações espalhadas pelo globo, mostram para a capital Aracaju/SE um valor de radiação média anual de 19,69 MJ/m²dia, com valor mínimo de 15,41 MJ/m²dia para junho e máximo de 23,18 MJ/m²dia para novembro e dezembro. O comparativo mostra valores próximos e demonstra coerência na metodologia da estimativa realizada neste trabalho.

3.2.1. Estimativa da radiação solar no plano ótimo de inclinação.

Para a geração de energia em placas fotovoltaicas é possível otimizar a captação. O plano constituído pelas células fotovoltaicas deve ser orientado para o norte e inclinado com um ângulo similar a latitude local. Para calcular a radiação solar incidente no plano ótimo de inclinação foi utilizado o software *radiasol 2.0*. A tabela 15 mostra os valores de radiação global, direta, difusa e inclinada em kWh/m²dia calculados no software.

Tabela 15- Valores de radiação global, direta, difusa e inclinada.

Mês	Global (kWh/m ² dia)	Direta (kWh/m ² dia)	Difusa (kWh/m ² dia)	Inclinada (kWh/m ² dia)
Jan	6,20	3,22	2,67	5,89
Fev	6,11	3,39	2,56	5,95
Mar	6,13	3,62	2,59	6,22
Abr	4,95	2,72	2,51	5,24
Mai	4,41	2,54	2,27	4,81
Jun	4,01	2,2	2,18	4,40
Jul	4,16	2,27	2,3	4,56
Ago	4,87	2,93	2,28	5,21
Set	5,58	3,3	2,46	5,76
Out	6,06	3,42	2,58	6,01
Nov	6,65	3,81	2,53	6,35
Dez	6,37	3,39	2,57	5,97

Os resultados da radiação inclinada demonstram um melhor aproveitamento no período de inverno. Para o mês de junho, por exemplo, observa-se um aumento de aproveitamento de 10 % em relação à radiação no plano horizontal.

3.3. Cálculo da Evapotranspiração de Referência do Local de Estudo.

Para a determinação da evapotranspiração de referência foi utilizado o software ET₀ calc (figura 24). O software de cálculo de ET₀ é disponibilizado pela FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) e acessível através do site <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>. O software calcula a evapotranspiração de referência através do método de Penman-Monteith, a partir da entrada de dados meteorológicos diários.

As variáveis de entrada para o cálculo de Et₀ foram: temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa média, velocidade do vento e radiação solar global estimada. Foram calculados 365 valores de Et₀ correspondentes ao ano de referência. O ano de referência, 2011, foi escolhido após a identificação de que a precipitação média anual deste ano possui um valor mais aproximado à precipitação média da série histórica. O gráfico da figura 24 ilustra as médias de precipitação da série histórica juntamente com os valores totais do ano de referência escolhido. A precipitação média total anual da série histórica é de 1020,6 mm e do ano escolhido, 2011, foi de aproximadamente 1040,7 mm.

Figura 24— Gráfico com as médias mensais de precipitação da série histórica e a precipitação total mensal para o ano de 2011.

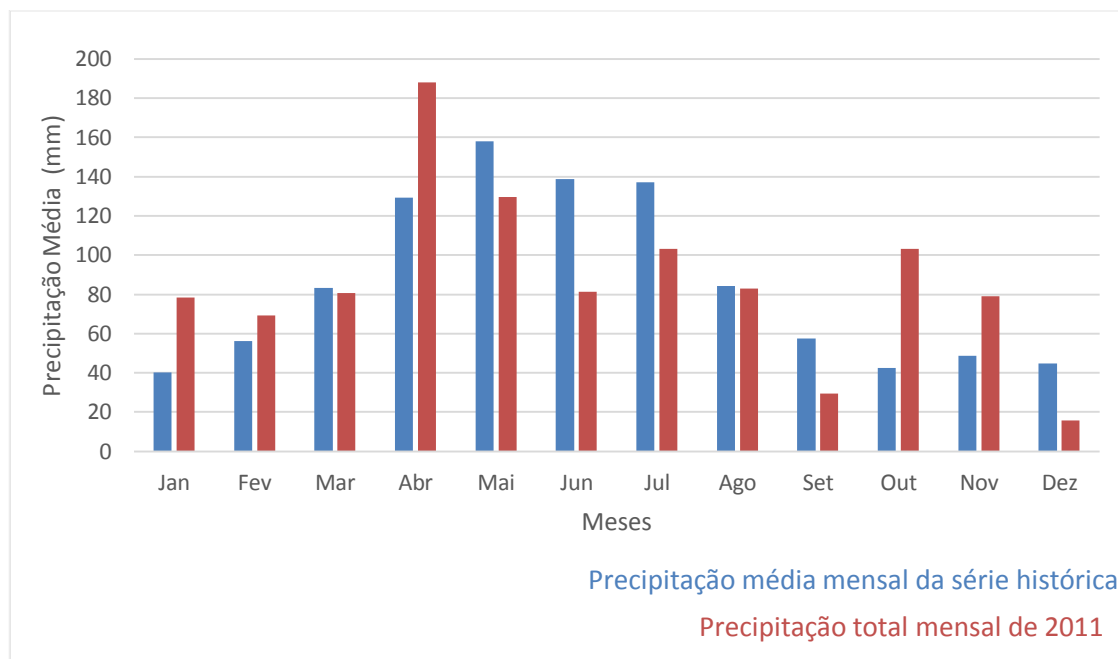


Figura 25— Definição das variáveis climáticas de entrada no software ET₀ calc.

Data and ETo menu

Station: Lagarto Country: Brasil File: Lagarto.DTA

Input data description | Meteorological data and ETo | Plot data | Export results

Air temperature ☒ Celsius ☐ Fahrenheit

☒ Mean temperature [°C]

☒ Minimum and Maximum temperature [°C]

Air humidity

☒ Mean Relative Humidity [%]

☐ Minimum and Maximum Relative Humidity [%]

☐ Mean dew point temperature [°C]

☐ Mean actual vapour pressure [kPa]

Psychrometric data

☐ Mean dry and wet bulb temperature [°C]

☐ Ventilated Coefficient psychrometer

☒ Natural ventilated 0.000800

☐ Indoors

IF missing air humidity

Tdew = Tmin + subtract 0.0 [°C] (sub)humid

Wind speed

☒ Mean wind speed [m/sec]

height of measurement 2.0 [meter]

IF missing wind speed

U2 = 2.0 m/sec light to moderate wind

Sunshine and Radiation

☐ Hours of bright sunshine (n) [hours]

☐ Relative sunshine hours (n/N) [-]

☒ Solar radiation (Rs) [MJ/m2.day]

☐ Net radiation (Rn) [MJ/m2.day]

Coefficients Angstrom equation

IF missing radiation

Rs = 0.16 x SQRT(Tmax - Tmin) x Ra

Cancel Main menu

A radiação solar utilizada foi a estimada neste trabalho. Todos os outros dados de entrada são provenientes da série histórica disponibilizada pela COHIDRO. Dos dados anuais foram considerados os valores máximos mensais como é mostrado na tabela 16.

Tabela 16– Valores máximos de ETo.

Mês	ETo (mm/dia)
Jan	5,6
Fev	5,6
Mar	5,4
Abr	5,2
Mai	4,5
Jun	4,0
Jul	4,0
Ago	4,3
Set	5,0
Out	5,2
Nov	5,7
Dez	5,7

3.4. Caracterização das Principais Culturas.

Para o dimensionamento do SFVI é essencial identificar quais as principais culturas do perímetro através dos dados de produção e quais suas características agronômicas com a finalidade de caracterizar a demanda calculada ideal para o sistema.

3.4.1. Dados de produção do Perímetro Irrigado Piauí.

A tabela 17, mostra os dados de produção do Perímetro Irrigado Piauí para o ano de 2014 com os valores de produção anual e área plantada para cada cultura.

Tabela 17– Dados de produção do perímetro irrigado Piauí para o ano de 2014.

Culturas	Área plantada/ano (ha)	Produção/ano (ton/ha)	Preço médio Ton. (R\$)	Produção Anual (R\$)
Aipim	38	570	1.000,00	570.000,00
Batata Doce	52	936	850,00	795.600,00
Mandioca	80	1.600	800,00	1.280.000,00
Maracujá	40	800	2.500,00	2.000.000,00
Pimenta	20	440	8.000,00	3.520.000,00
Malagueta				
Quiabo	60	900	1.000,00	900.000,00
Tomate	30	1.500	1.500,00	2.250.000,00
Outras culturas	177	1.100	-	1.714.000,00
Total	497	7.846	-	13.029.600,00

O sistema de irrigação fotovoltaico foi dimensionado para a cultura de maior demanda, e, para calcular a demanda hídrica é de fundamental importância obter dados agronômicos referentes a cada cultura em particular, conforme a tabela 18.

Tabela 18– Dados referentes às principais culturas presentes no Perímetro Irrigado Piauí.

Culturas	Espaçamento	Coeficiente de Cultura (Kc)		
		início	meia-estação	Fim
Aipim	1,0X0,6	0,5	1,10 ¹	0,65
Batata Doce	0,70X0,40	0,5	1,15 ²	0,65
Mandioca	1,0X0,7	0,3	1,10 ³	0,3
Maracujá	1,0X0,40	0,4	1,06 ⁴	0,64
Pimenta Malagueta	1,20X1	0,3	1,05 ⁵	0,65
Quiabo	1,0X0,6	0,5	1,0 ⁶	0,3
Tomate	1,20x0,60	0,5	1,10 ⁷	0,6

^{1, 2, 3, 7} (Allen, 1998)

^{4,5,6} Banco de dados EMBRAPA.

3.5. Demanda Hídrica das Culturas e Potência de Instalação do Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento do SFVI foi feito levando em consideração a maior demanda por hectare possível. Este cenário considera o ponto crítico relacionando as variáveis: radiação solar média mensal estimada (R_s), evapotranspiração crítica mensal (ET_0), cultura de maior demanda (K_c) e os valores máximos dos coeficientes de estresse hídrico (K_s) e de localização (K_l).

A demanda hídrica foi calculada para as culturas do aipim, batata doce, mandioca, maracujá, pimenta malagueta, quiabo e tomate. De todas as culturas citadas, em todos os meses, a maior demanda de água foi da cultura de batata-doce.

A tabela 19 representa os resultados da maior demanda em m³/dia para o lote padrão de 0,5 ha.

Tabela 19– Demanda hídrica para o lote padrão de 0,5 ha.

Mês	Demanda (m³/dia)
Jan	30,59
Fev	30,59
Mar	29,50
Abr	28,41
Mai	24,58
Jun	21,85
Jul	21,85
Ago	23,49
Set	27,32
Out	31,14
Nov	31,14
Dez	31,14

A partir dos dados de demanda hídrica, foram construídas planilhas para o cálculo da potência de instalação final (W_p), conforme exemplificado no apêndice C.

Baseado nas informações das planilhas utilizadas de área irrigável e potência instalada que dependem da demanda e das alturas manométricas, foram elaborados gráficos específicos que relacionam a demanda de irrigação crítica mensal e a potência instalada em W_p necessária para a série de alturas manométricas consideradas conforme as figuras de 26 a 37.

Esses gráficos têm como objetivo auxiliar na implementação de futuros sistemas fotovoltaicos de irrigação no local de estudo servindo como referência e guia prático para o dimensionamento dos mesmos, levando em consideração o pior cenário possível. O gráfico representa um conjunto de informações que dependem da cultura e da sua demanda hídrica levando em consideração as características climáticas locais e a radiação solar estimada neste trabalho.

Figura 26– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Janeiro

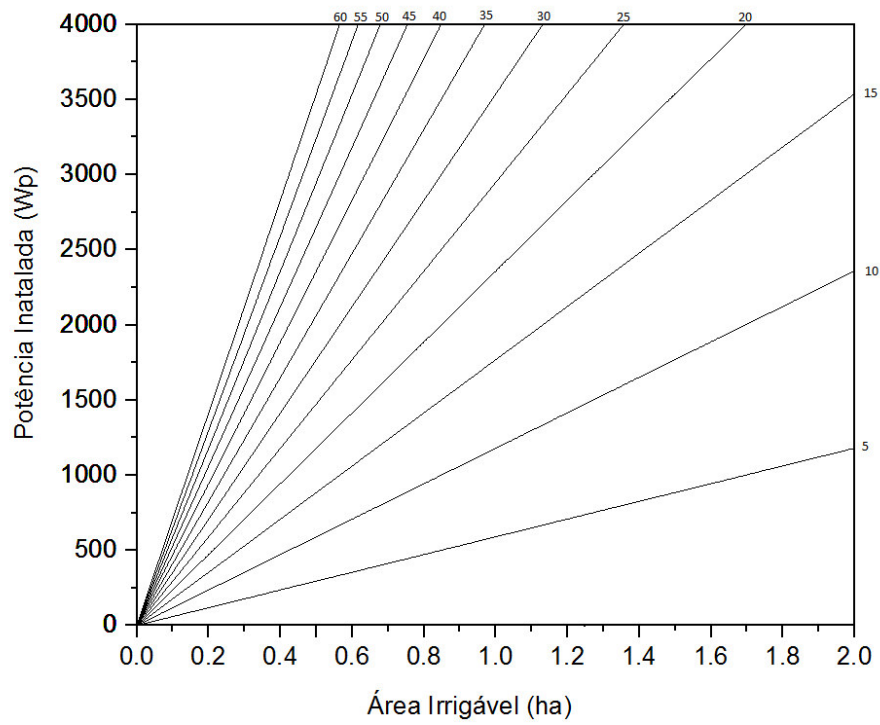


Figura 27– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Fevereiro.

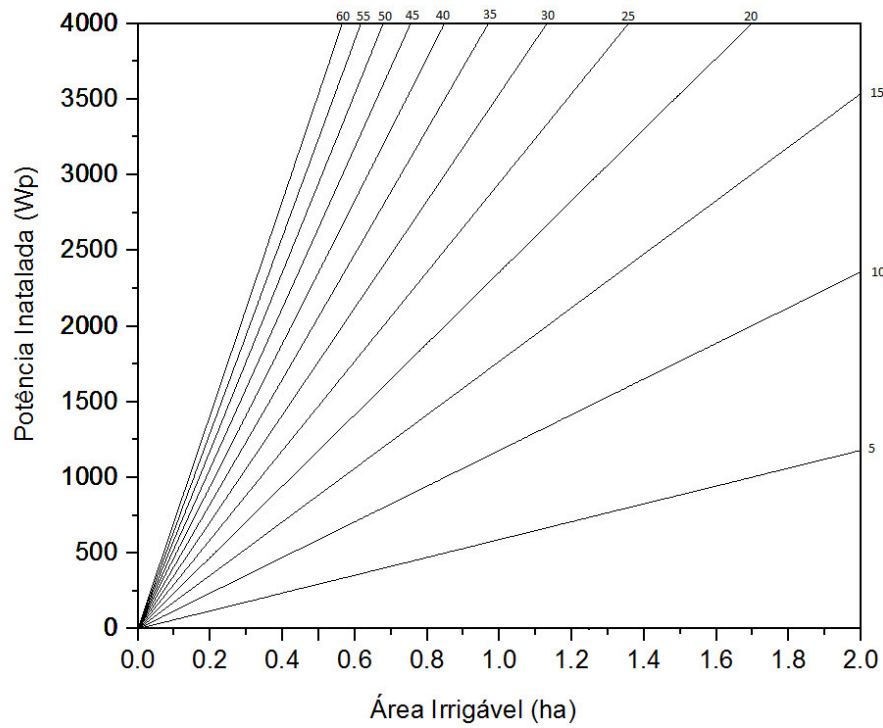


Figura 28– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Março.

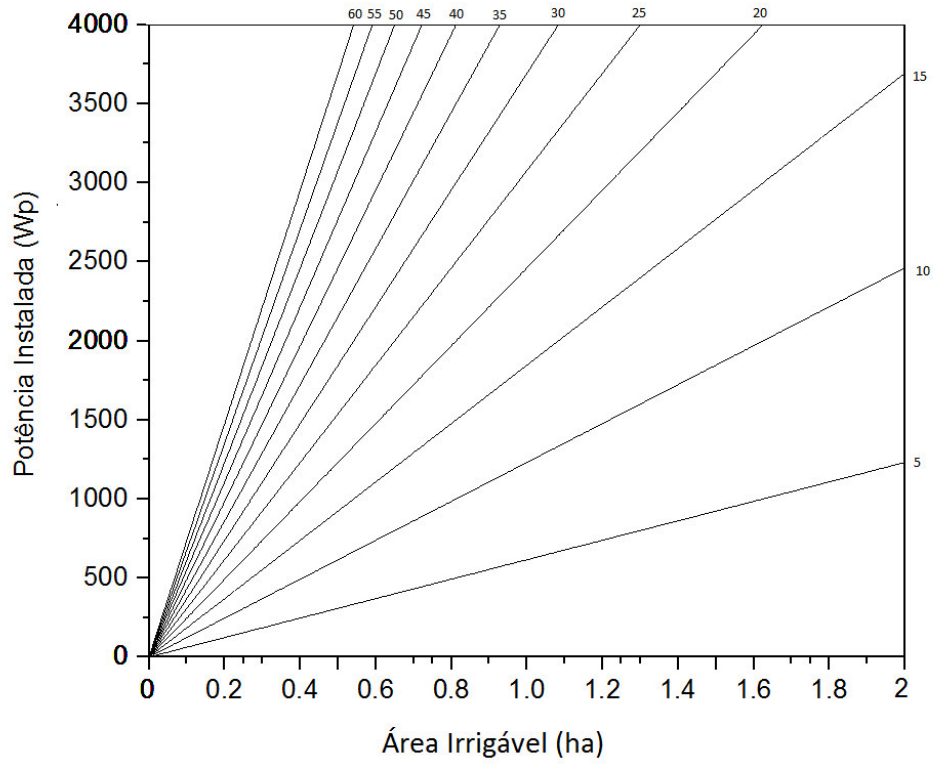


Figura 29– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Abril.

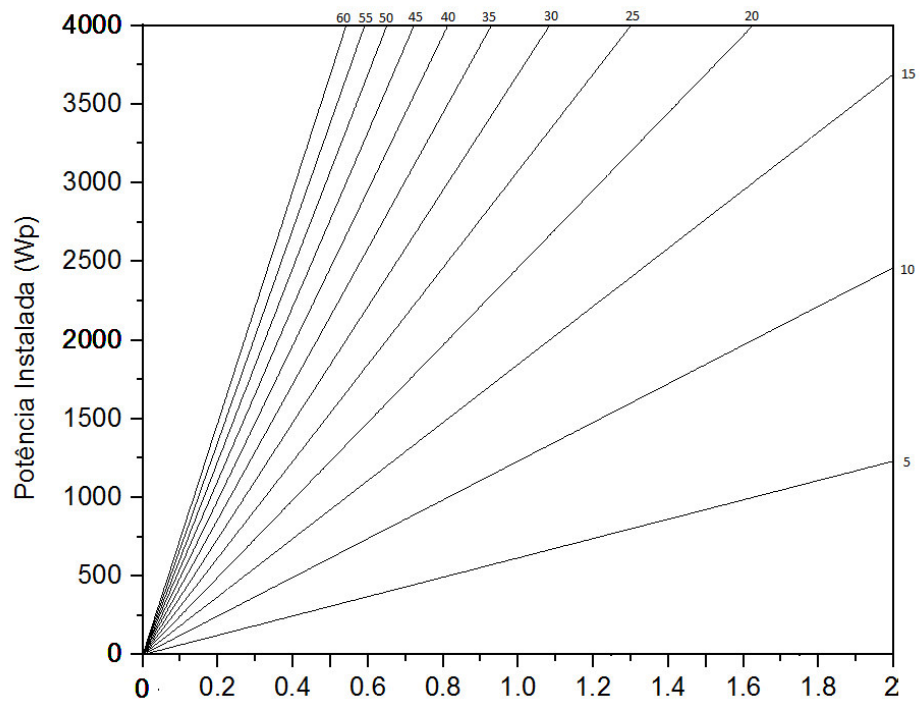


Figura 30 – Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Maio

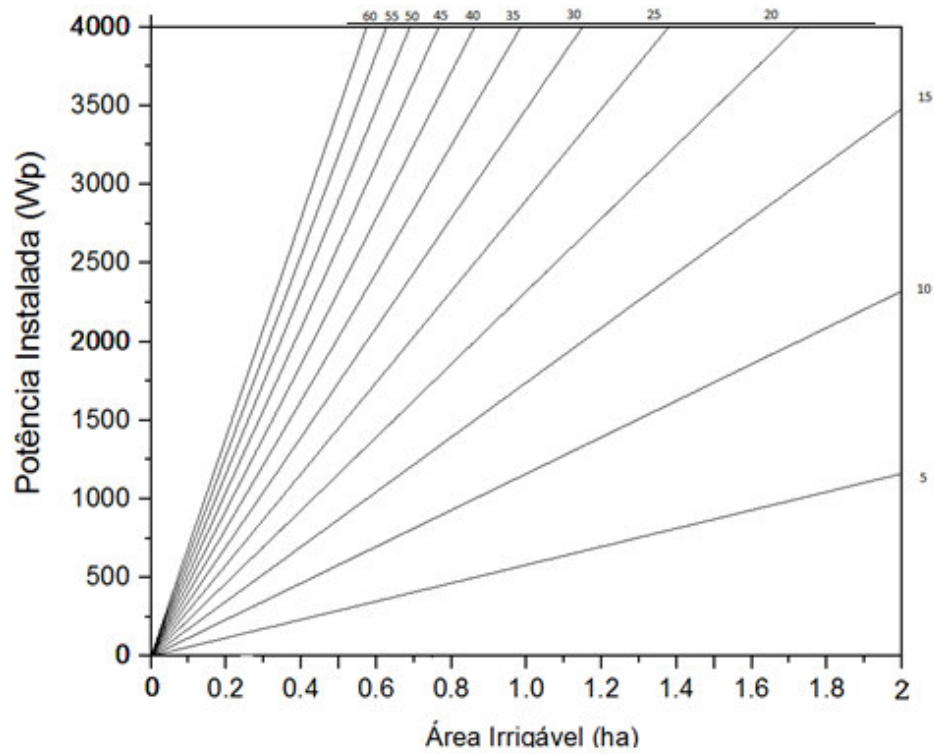


Figura 31 – Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Junho.

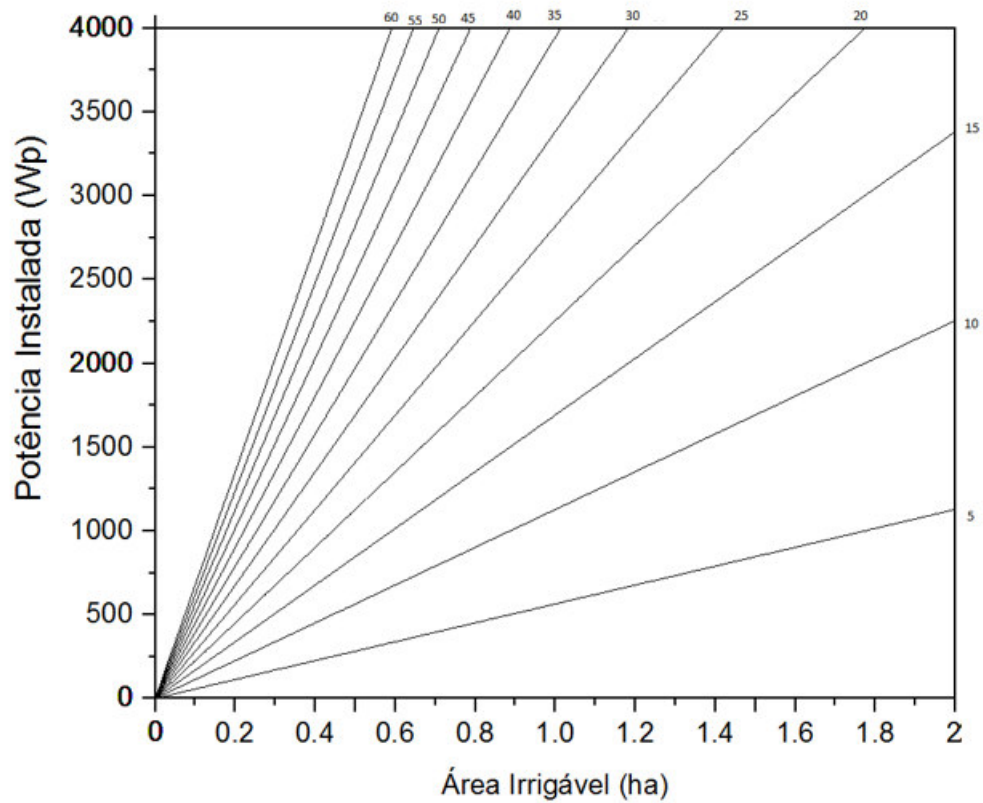


Figura 32– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Julho.

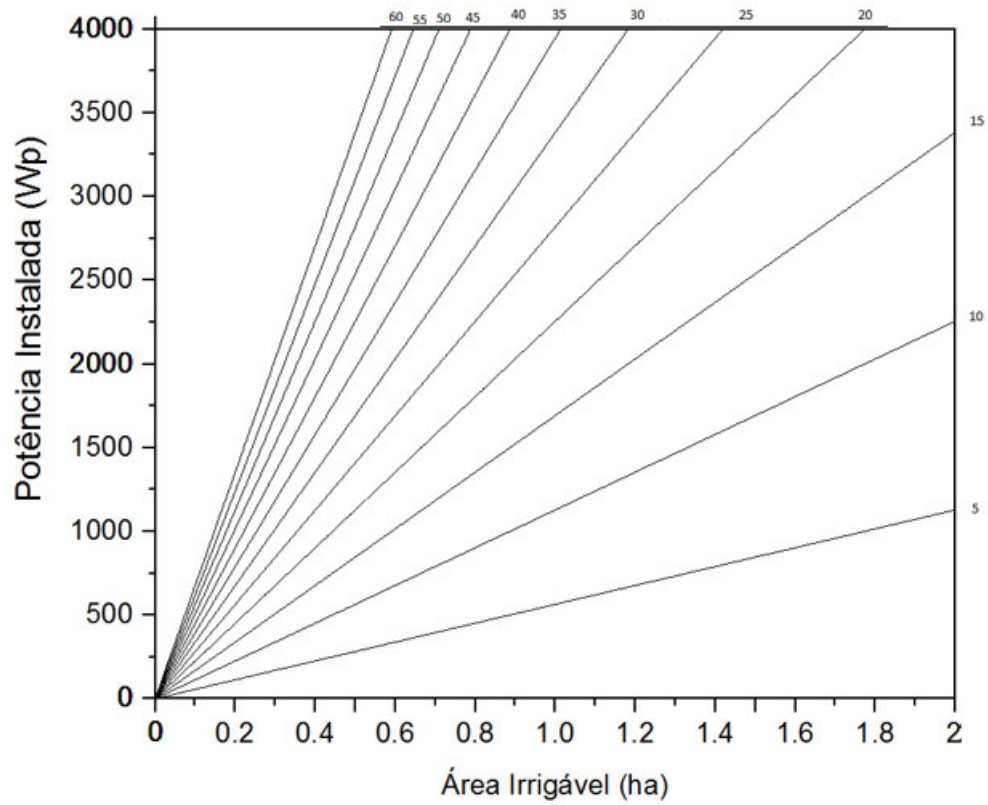


Figura 33– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Agosto.

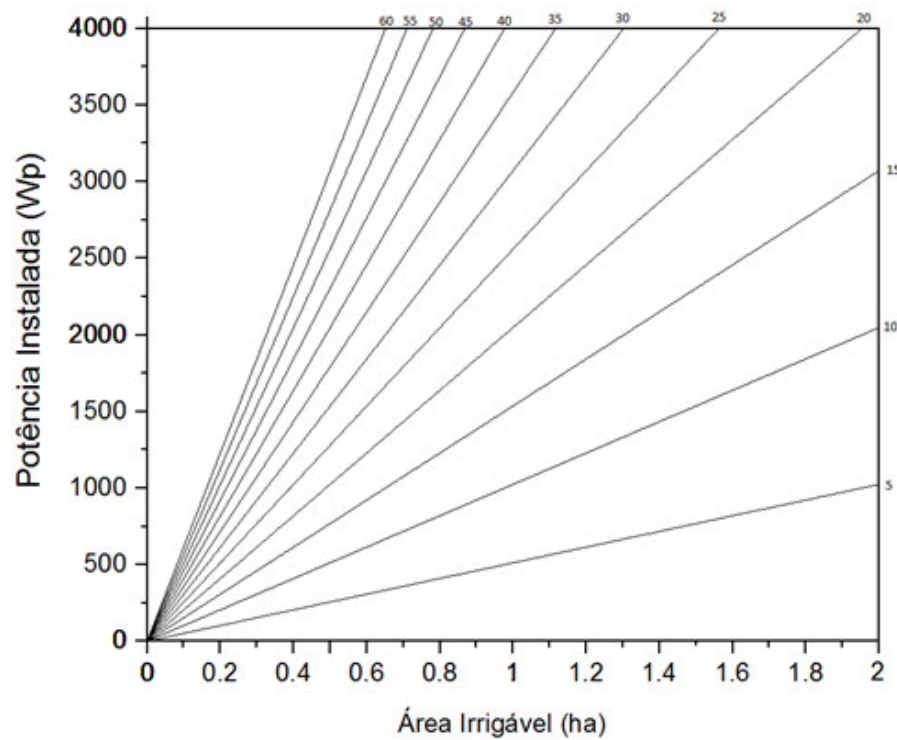


Figura 34– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Setembro.

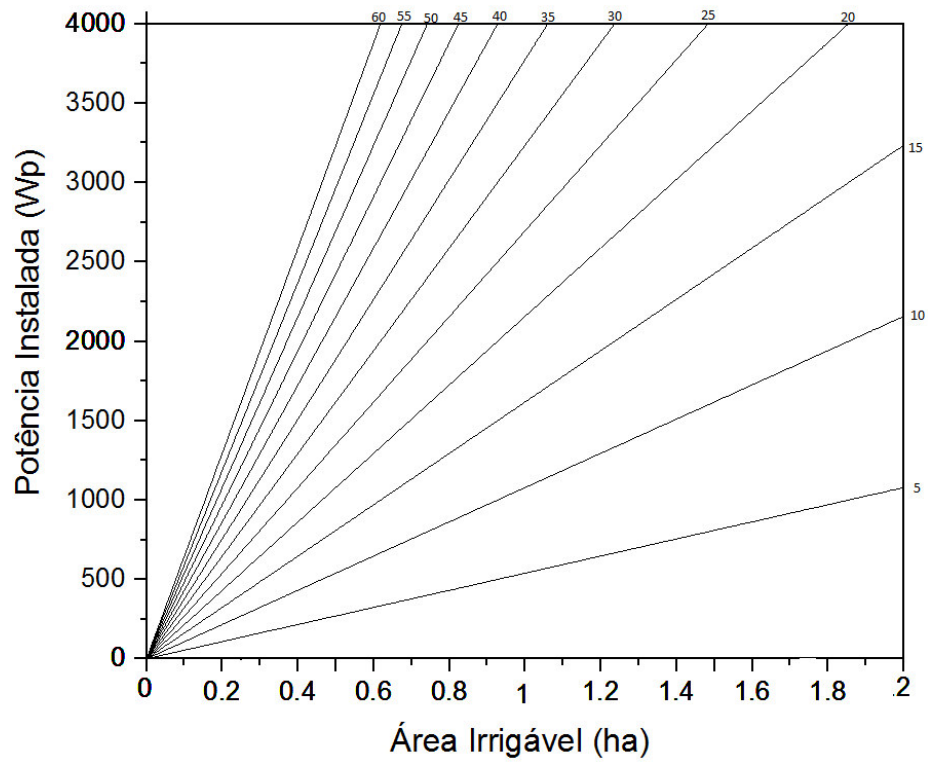


Figura 35– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Outubro.

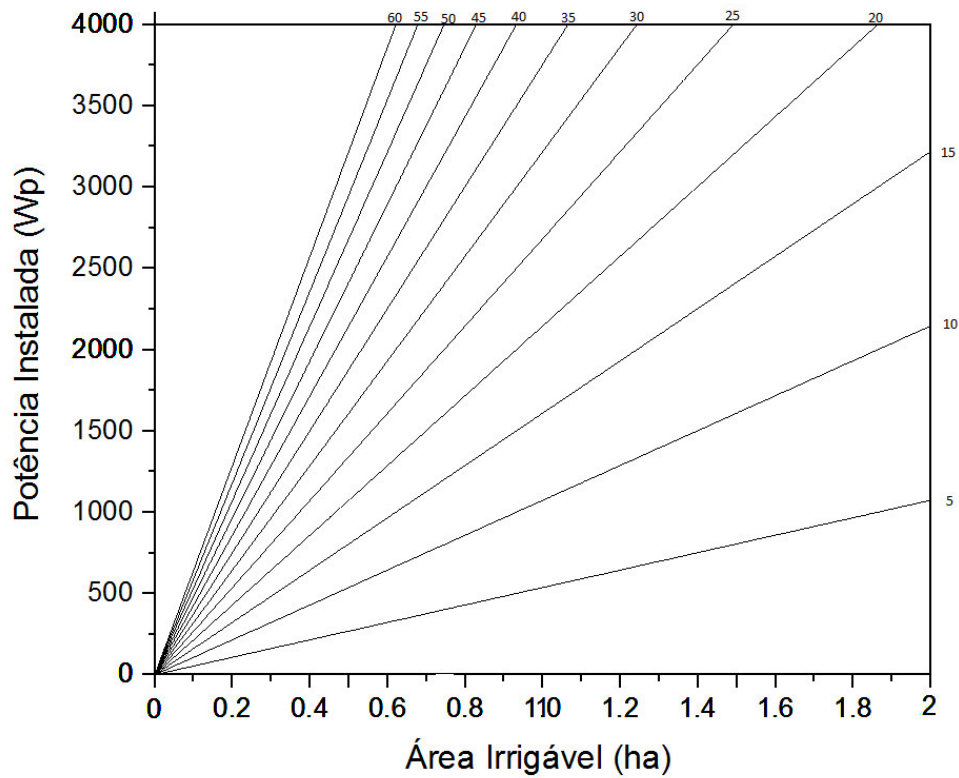


Figura 36– Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Novembro.

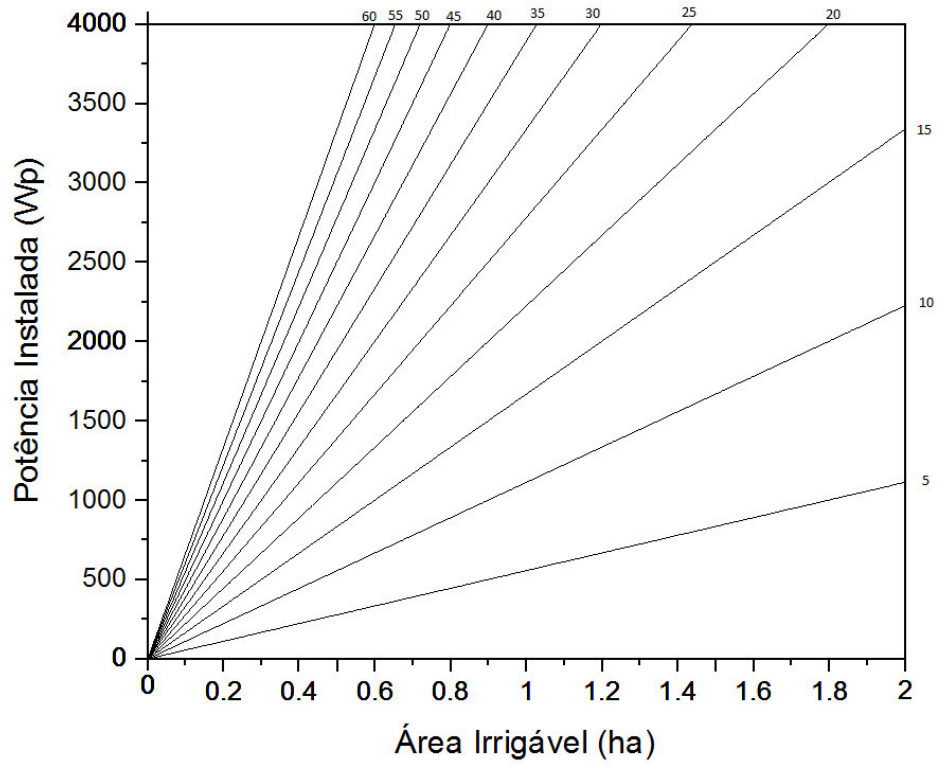
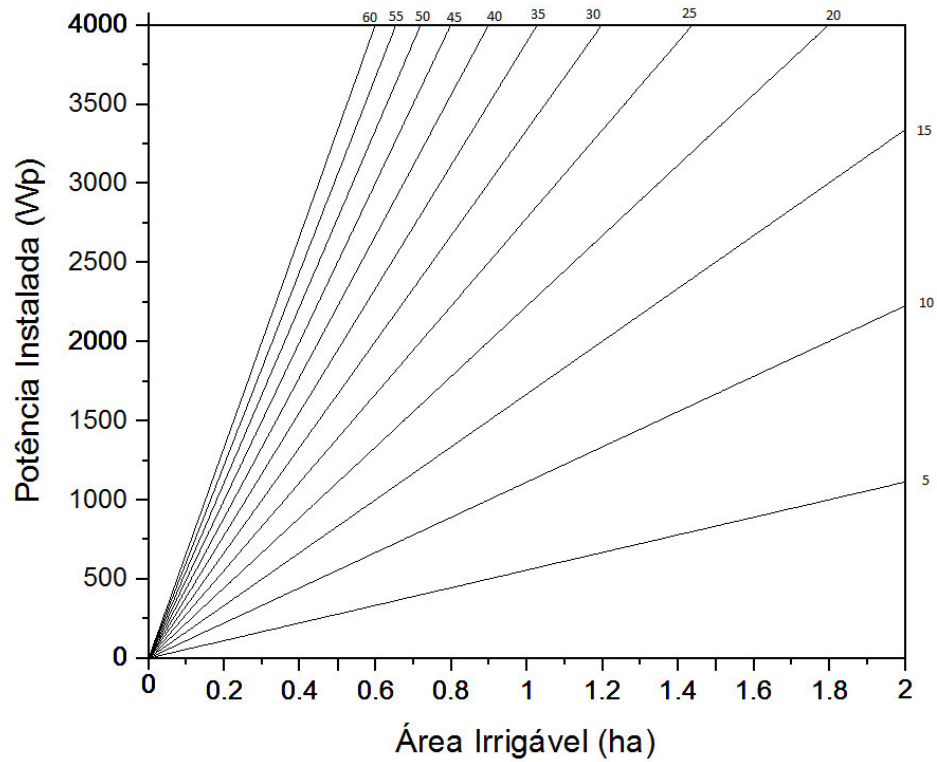


Figura 37 – Gráfico área irrigável x potência instalada para o mês de Dezembro.



Após identificar a área de irrigação (ha) e a altura manométrica da instalação (m ou m.c.a), que dependerá da fonte de água e dos componentes do sistema para irrigação, obtém-se através do gráfico a potência necessária dos módulos fotovoltaicos em Wp a ser instalada para a região de estudo em específico.

Considerando o lote padrão de 0,5 ha, as potências instaladas de módulos fotovoltaicos necessárias para suprir as demandas variaram mês a mês. Considerando a altura manométrica mínima e máxima proposta (5 e 60 m.c.a, respectivamente) foi encontrado menor necessidade para agosto com uma variação de 256 Wp a 3.100 Wp e maior necessidade de potência instalada fotovoltaica para abril com uma variação de 308 Wp a 3.700 Wp.

O mês de abril, apesar de apresentar uma demanda de 28,41 m³/dia para cada 0,5 ha, que é inferior às maiores demandas encontradas de 31,14 m³/dia (outubro, novembro e dezembro), requer uma maior potência instalada. Isso ocorre porque a radiação solar global estimada para este mês foi inferior em relação aos meses de maior demanda, resultando em uma potência requerida do sistema fotovoltaico superior. Desta forma, o gráfico referente a abril (figura 29), representa, entre todos os meses, o pior cenário encontrado e será utilizado para a análise econômica comparativa. No apêndice D está disponível uma versão expandida do gráfico.

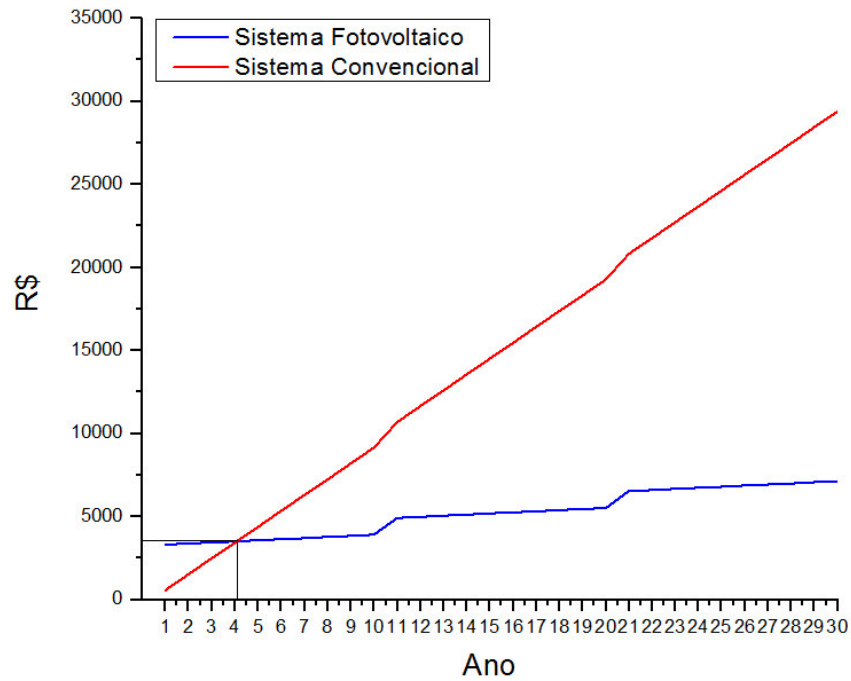
3.6. Análise Econômica Comparativa

Conforme descrito na metodologia, analisou-se os custos ao longo do tempo entre o sistema fotovoltaico de irrigação (SFVI) e o sistema convencional para cada 0,5 ha irrigados, levando-se em consideração o tamanho médio dos lotes. Para o SFVI, foram consideradas alturas manométricas entre 5 e 60 m.c.a, com intervalos de 5 m.c.a. Além da análise para a situação atual, foram simulados os impactos na comparação levando em consideração as variações dos preços dos módulos fotovoltaico encontrados no mercado nacional e mudanças esperadas na tarifa de energia.

Para cada altura manométrica hipotética do sistema, tem-se um gráfico (figuras de 39 a 50) com o custo acumulado ao longo do tempo de vida útil do sistema fotovoltaico para ambos os casos. Nos gráficos, o prolongamento no eixo das abcissas da interseção das retas representativas de cada sistema representa o tempo de retorno de investimento na aplicação do sistema fotovoltaico. As planilhas de cálculo detalhadas encontram-se no apêndice E. O cálculo da área total requerida levou em consideração a relação de aproximada de 7 m² para cada 1000 Wp existente para painéis fotovoltaicos, segundo os fabricantes.

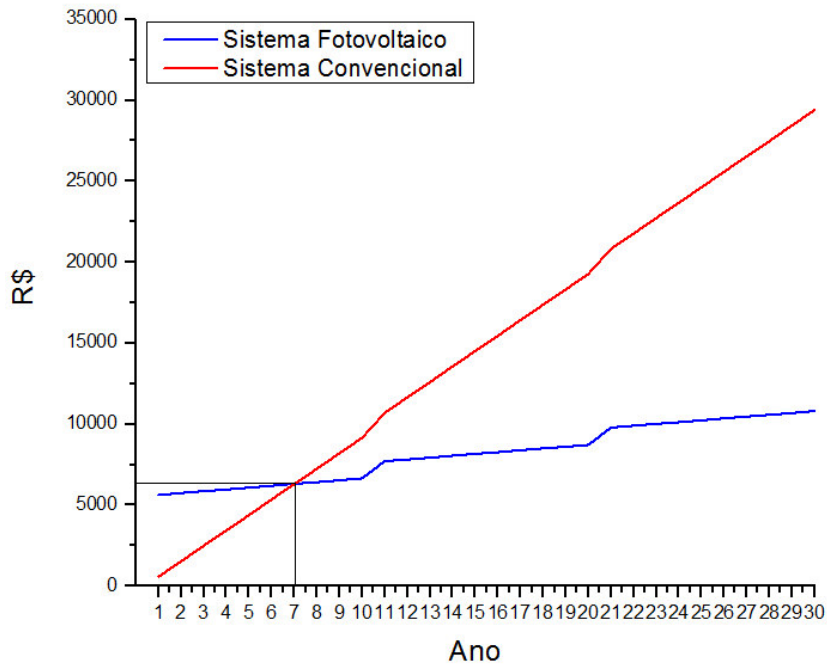
3.6.1. Altura Manométrica Total (AMT) de 5 m.c.a

Figura 38– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 5 m.c.a.



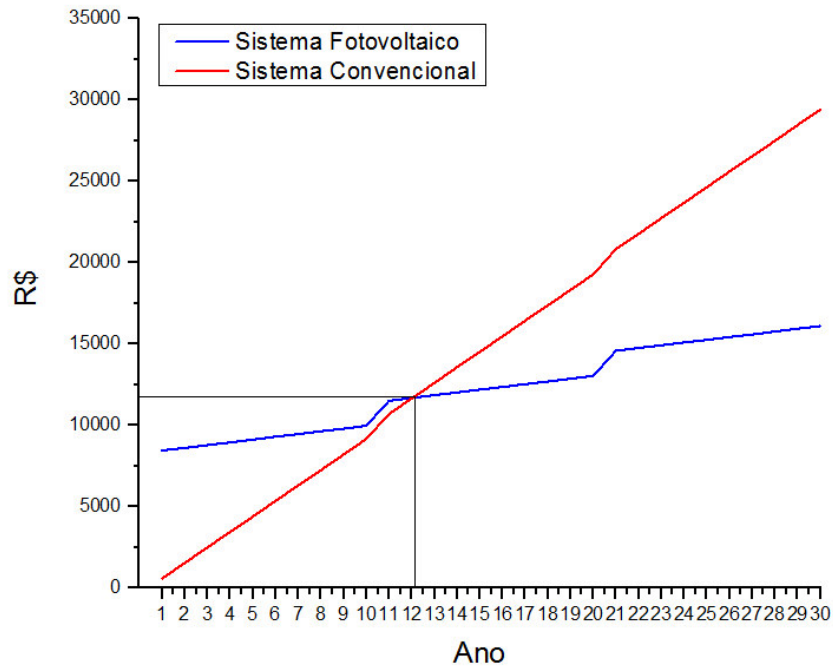
3.6.2. Altura Manométrica Total (AMT) de 10 m.c.a

Figura 39– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 10 m.c.a.



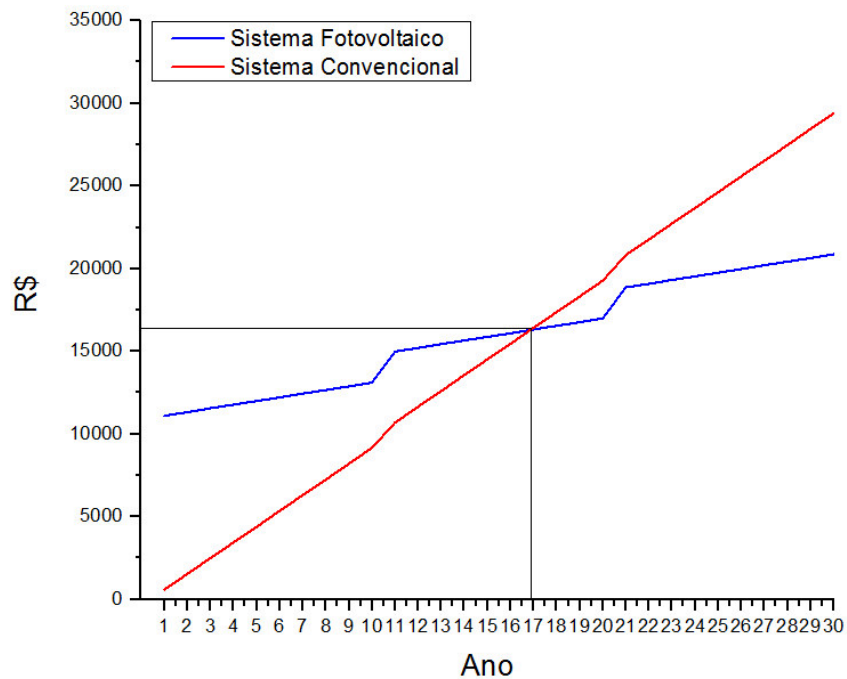
3.6.3. Altura Manométrica Total (AMT) de 15 m.c.a

Figura 40– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 15 m.c.a.



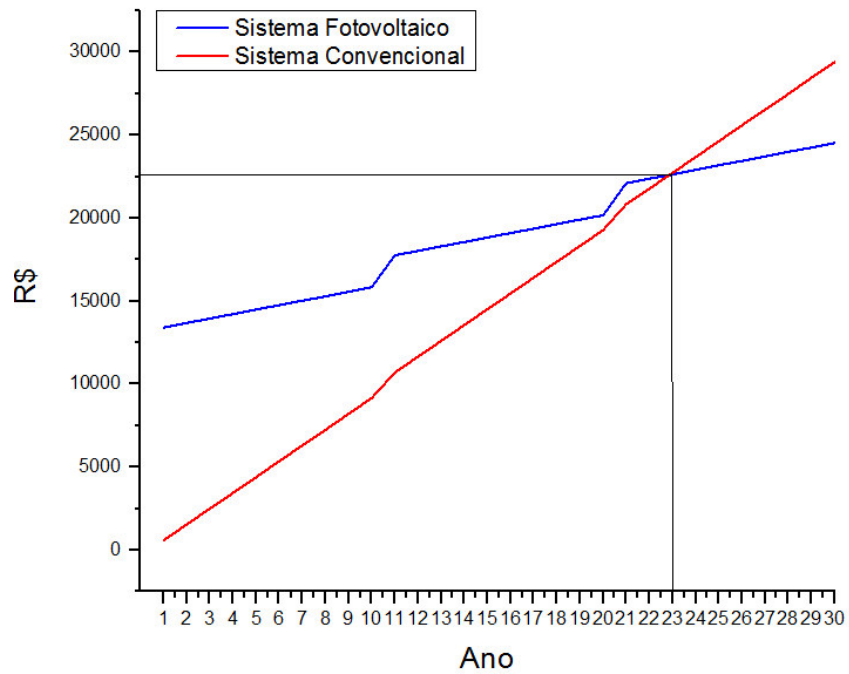
3.6.4. Altura Manométrica Total de (AMT) de 20 m.c.a

Figura 41– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 20 m.c.a.



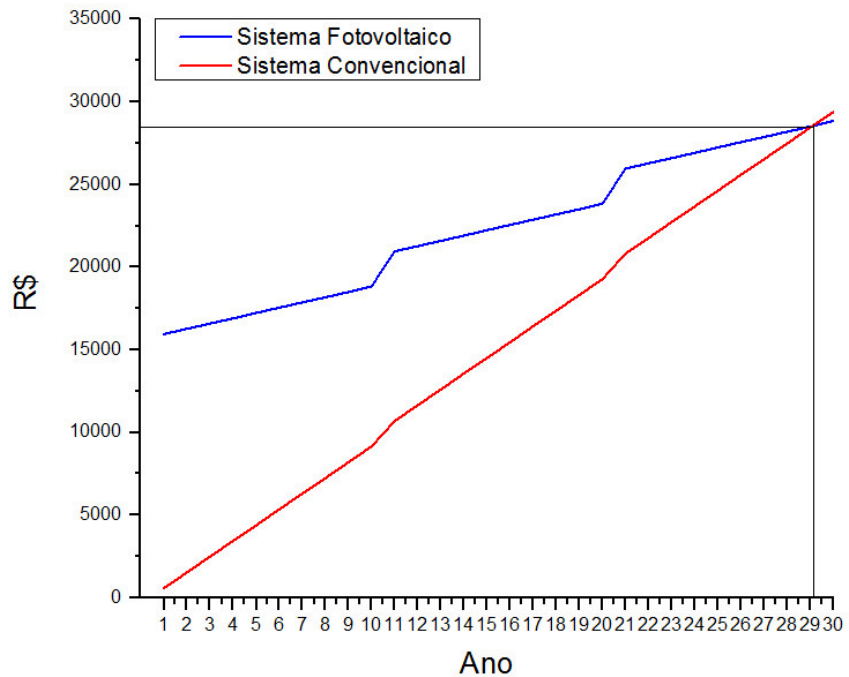
3.6.5. Altura Manométrica Total de (AMT) de 25 m.c.a.

Figura 42– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 25 m.c.a.



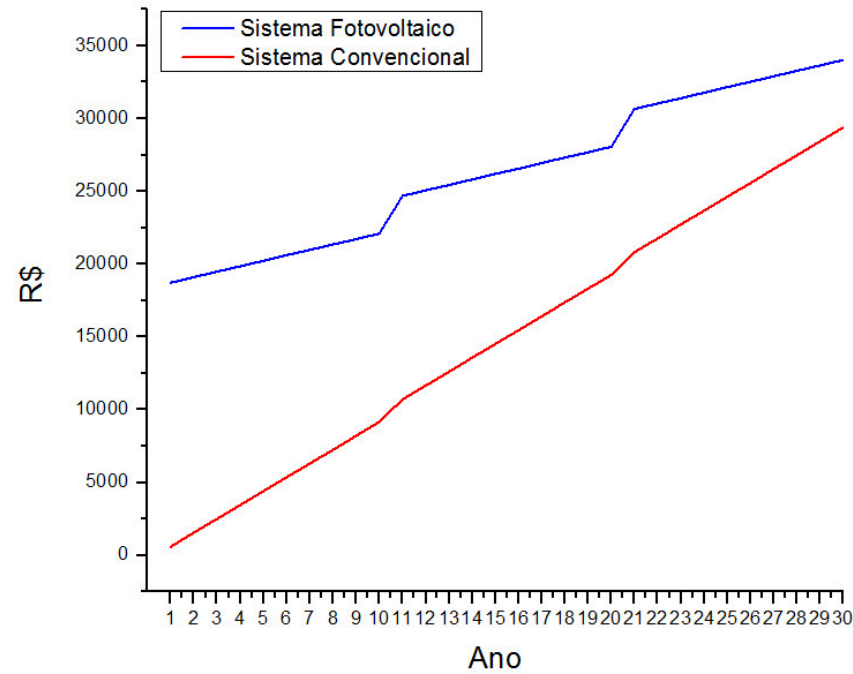
3.6.6. Altura Manométrica Total de (AMT) de 30 m.c.a

Figura 43– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 30 m.c.a.



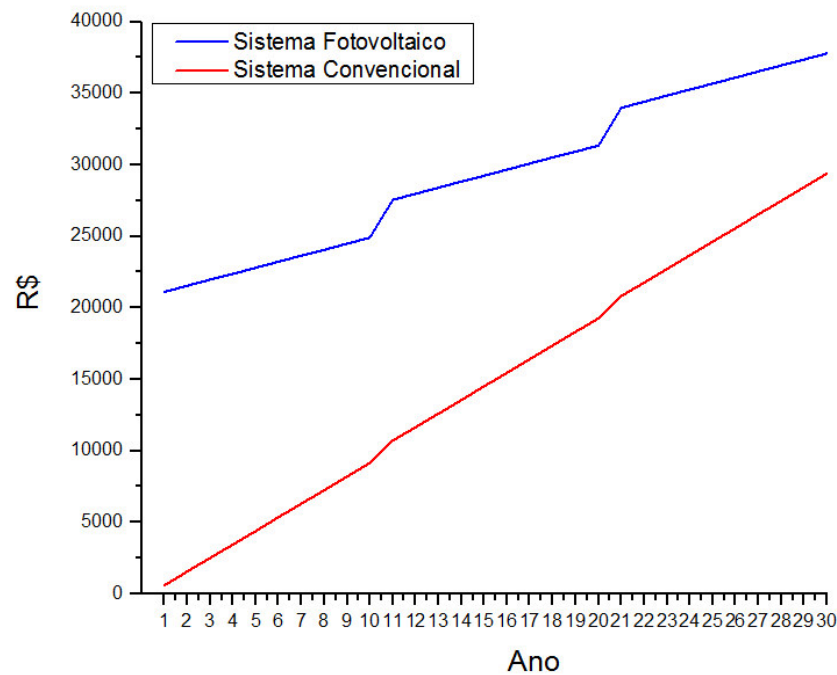
3.6.7. Altura Manométrica Total de (AMT) de 35 m.c.a

Figura 44– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 35 m.c.a.



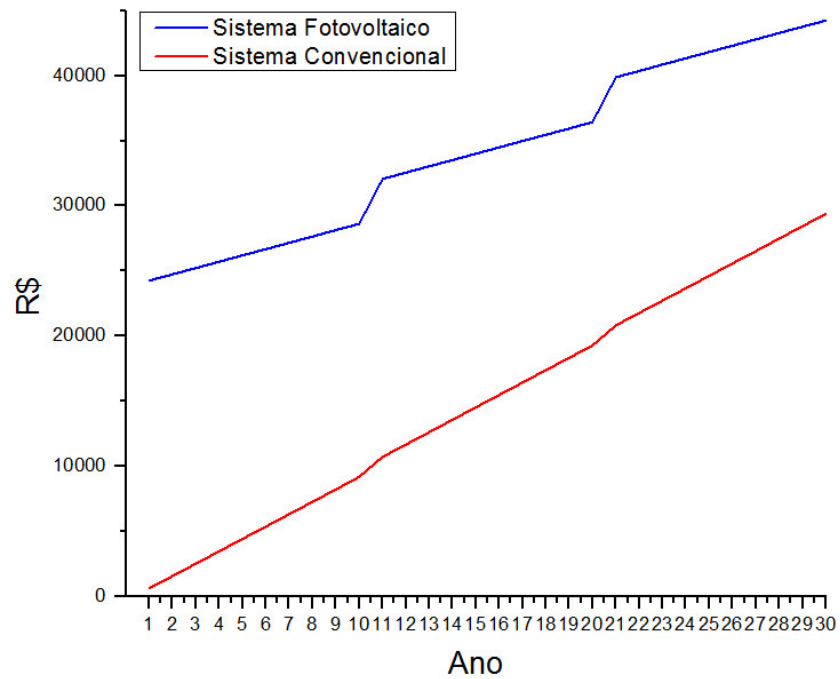
3.6.8. Altura Manométrica Total de (AMT) de 40 m.c.a

Figura 45– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 40 m.c.a.



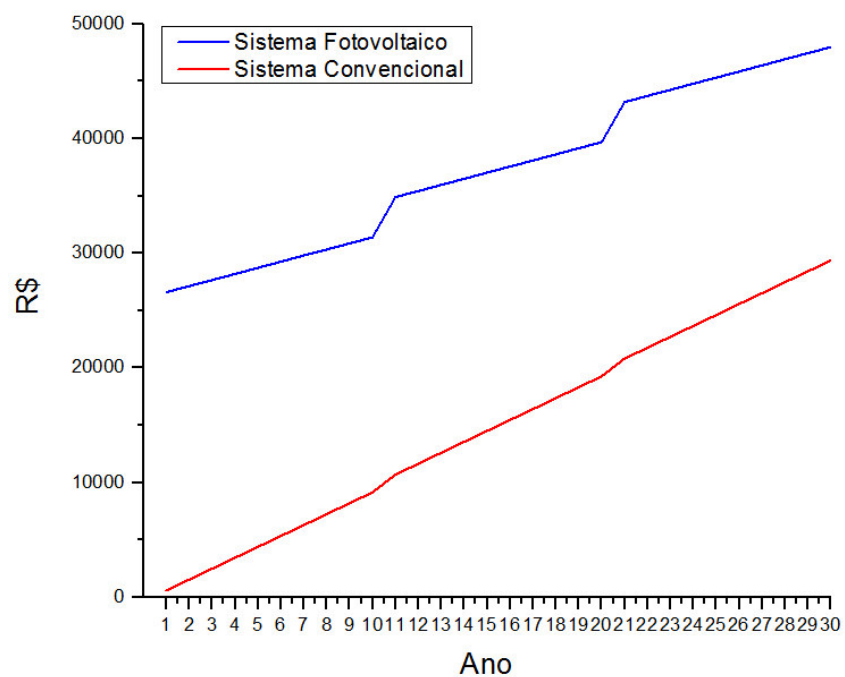
3.6.9. Altura Manométrica Total de (AMT) de 45 m.c.a

Figura 46– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 45 m.c.a.



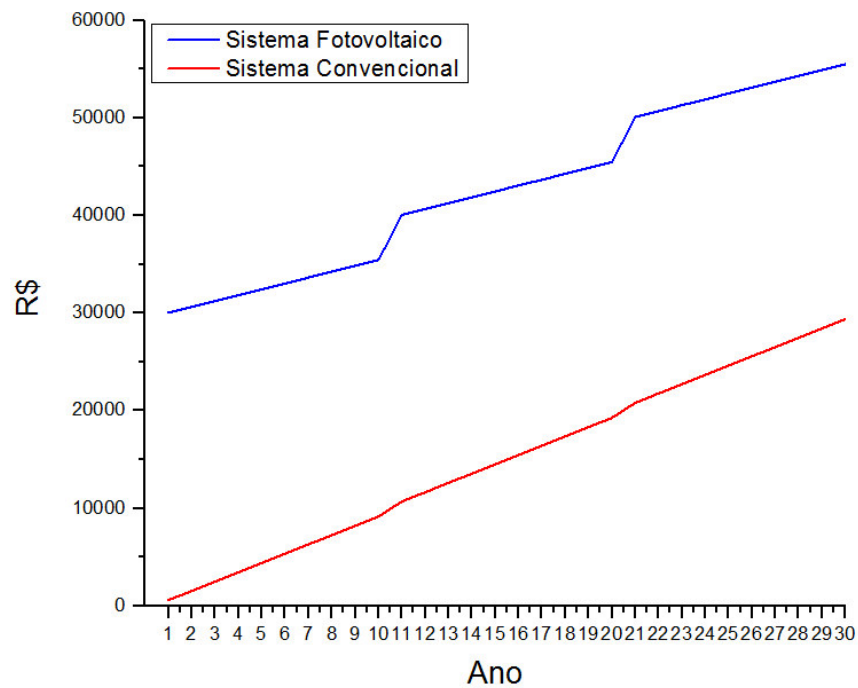
3.6.10. Altura Manométrica Total de (AMT) de 50 m.c.a

Figura 47– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 50 m.c.a.



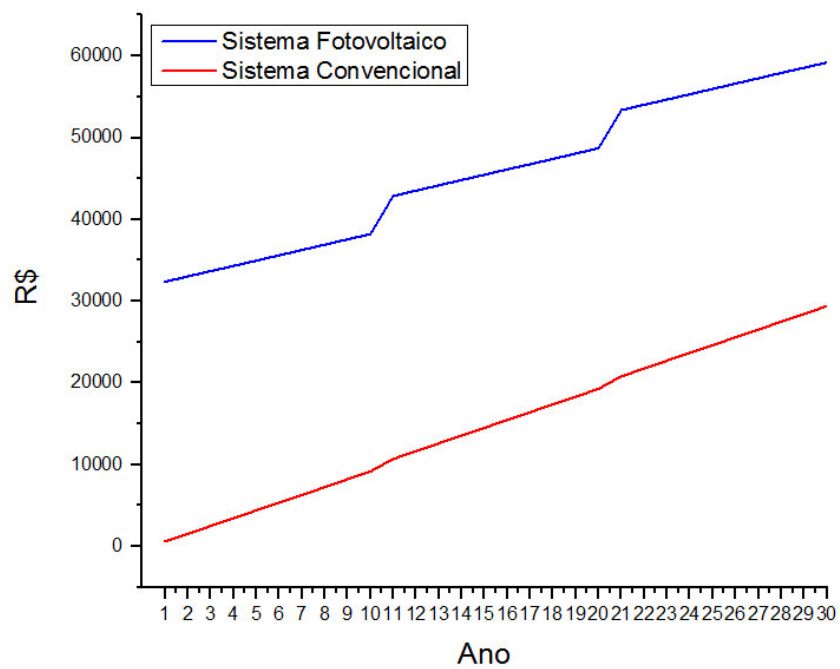
3.6.11. Altura Manométrica Total de (AMT) de 55 m.c.a

Figura 48– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 55 m.c.a.



3.6.12. Altura Manométrica Total de (AMT) de 60 m.c.a

Figura 49– Custo acumulado comparativo entre o sistema convencional e o sistema fotovoltaico para altura manométrica total de 60 m.c.a.



Os resultados da análise comparativa demonstraram, como esperado, um aumento gradual do custo do uso do sistema fotovoltaico à medida que aumenta a altura manométrica do sistema. Tanto para a potência requerida dos módulos quanto para a área total requerida dos painéis existe um padrão linear crescente em relação ao aumento da altura manométrica do sistema hipotético.

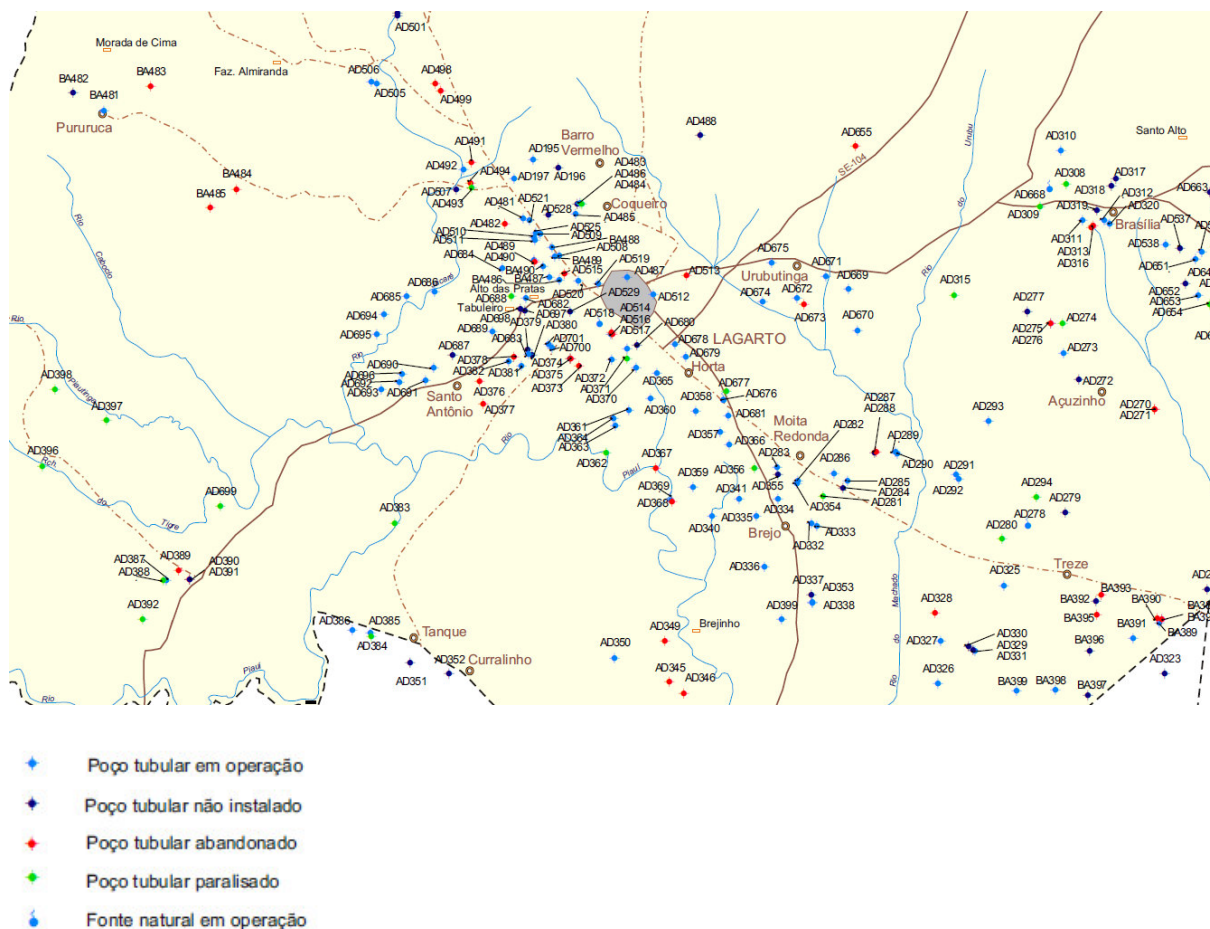
Em relação ao comparativo sistema fotovoltaico x sistema convencional aplicado atualmente no perímetro, considerando as variáveis aplicadas, foi constatado que os sistemas fotovoltaicos são competitivos, para a demanda de irrigação em lotes de 0,5 ha, em sistemas com alturas manométricas totais de até 30 m.c.a (figura 43), a partir desse valor, em sistemas com alturas manométricas superiores (figura 44 a 49), o investimento inicial não é recuperado no tempo de vida útil do sistema fotovoltaico em comparação com o sistema convencional.

O tempo de retorno de investimento mínimo encontrado para o SFVI foi de aproximadamente 4 anos para altura manométrica de 5 m.c.a (figura 38) com um investimento inicial de R\$ 3.314,52. Para as alturas manométricas de 10; 15; 20 e 25 m.c.a (figura 39 a 42), foi encontrado um tempo de retorno de investimento de aproximadamente 7; 12; 17 e 23, respectivamente. Em média para cada 5 m.c.a acrescidos, o tempo de retorno de investimento aumenta em 1,6 vezes.

A variação da altura manométrica de um sistema de irrigação depende principalmente de como será feita a captação da água e dos componentes incluídos no sistema hidráulico. Como foi visto no item 1.4 deste trabalho, o sistema de bombeamento fotovoltaico pode ser feito com fonte de água submersa em poços tubulares ou mesmo em fontes de água superficiais. Para discutir, em termos práticos, os resultados aqui encontrados, é necessário avaliar a área do perímetro.

Um estudo feito pelo Serviço Geológico do Brasil para o Projeto Cadastro da Infraestrutura Hídrica do Nordeste – Diagnóstico do Município de Lagarto fez um levantamento da quantidade e situação dos poços tubulares da região de Lagarto, consequentemente, na área que engloba o perímetro irrigado Piauí (figura 51).

Figura 50– Poços tubulares existentes na região do perímetro irrigado Piauí.



Fonte: (SEPLANTEC, 2002)

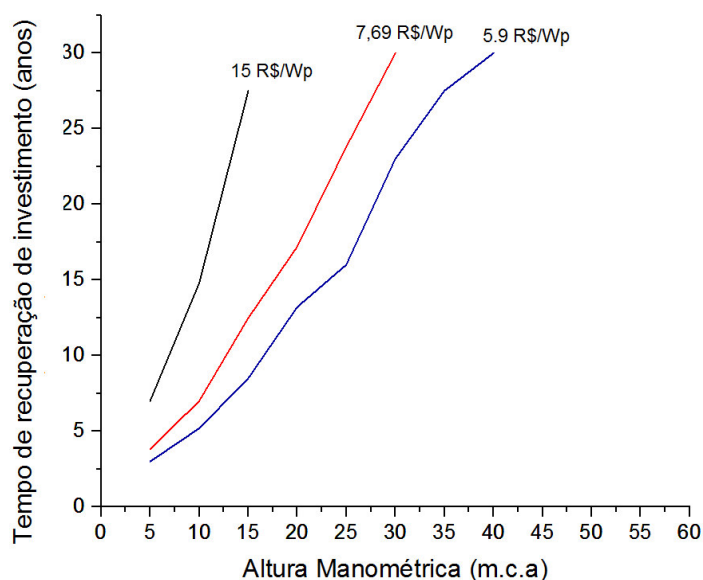
Foram levantados cerca de 300 poços tubulares em operação, sendo que as profundidades variam entre 20 e 60 m e as vazões se encontram em uma faixa de valor entre 2000 e 20000 L/h, em sua maioria, as profundidades variam entre 50 e 70 m. Portanto, o sistema de irrigação fotovoltaico com captação em águas subterrâneas seria viável economicamente apenas em uma parcela dos poços tubulares, com profundidade limite inferiores próximas a 30 m, pois a partir deste valor a perda de carga superaria o valor de 30 m.c.a.

Como forma de contornar esse problema, foi avaliado também a possibilidade de um sistema em que a água do poço tubular seria levada até a superfície através do uso de uma bomba elétrica submersa e apenas a irrigação seria responsabilidade do sistema fotovoltaico. Neste cenário, contando com o custo adicional do funcionamento da bomba submersa e considerando uma profundidade média do poço de 60 m, o sistema fotovoltaico ainda seria

competitivo em pressões de até 10 m.c.a (panilha descritiva no pêndice E). É um resultado expressivo considerando que está se comparando um sistema alternativo solar com o convencional elétrico.

Entre as variáveis consideradas na análise de custos, pode-se observar que as que mais pesam no comparativo final são o preço do módulo fotovoltaico (R\$/Wp) e a tarifa energética (R\$/kWh). O preço dos módulos fotovoltaicos no Brasil já vem sofrendo, ao longo do tempo, sucessivas quedas, mesmo assim, comparado com os outros países o seu valor ainda é alto. Segundo o Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, em estudo realizado em 2015, os preços no Brasil variam entre R\$ 5,9/Wp e R\$ 15/Wp, no entanto o valor médio encontrado para a região nordeste é de R\$ 7,69/Wp. Na análise comparativa deste trabalho foi considerado o valor médio do Wp pesquisado, mas, como comparativo, pode-se observar o fator de impacto desses valores no tempo de retorno de investimento por altura manométrica total (AMT) para a situação em estudo conforme a figura 52.

Figura 51– Comparativo de altura manométrica x tempo de retorno de investimaneto para os preços mínimos, médios e máximos de módulos fotovoltaicos encontrados no mercado brasileiro em 2015.



Os dados demonstram que para o valor mínimo encontrado no mercado, que é de 5,9 R\$/Wp, o sistema fotovoltaico se torna competitivo até alturas manométricas de 40 m.c.a, já para os valores máximo de 15 R\$/Wp esse valor cai para aproximadamente 15 m.c.a.

Em relação à tarifa energética, o seu valor tem um peso considerável na análise comparativa. A primeira análise levou em consideração o valor da tarifa para serviço de irrigação pública do ano de 2015. Como forma de visualizar também o fator de impacto desta variável foi feita uma projeção com o aumento esperado para o ano de 2016, segundo a ANEEL, existe uma estimativa de aumento da tarifa em 10%. O aumento em 10% da tarifa energética reduz o tempo de retorno de investimento em 2 anos a favor do uso da energia fotovoltaica.

A análise comparativa ao longo do tempo se mostra complexa à medida que não se pode prever como as variáveis irão se comportar, muitas delas dependem da economia do momento, fatores climáticos, políticos e etc. Ainda assim, é válido a análise utilizando as variáveis e seus valores no momento presente com a finalidade de avaliar o contexto e o potencial para a implantação da tecnologia fotovoltaica.

CAPÍTULO 4

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se dispôs em avaliar o potencial energético renovável para o uso de sistemas fotovoltaicos de irrigação na região no perímetro irrigado Piauí em Lagarto/SE, e após se concretizar todas as etapas metodológicas propostas, resultados e discussões, seguem as principais conclusões.

Estatisticamente, a radiação solar global diária pode ser estimada, na região de Lagarto/SE, com boa precisão pelo modelo de Angstrom-Prescott, através dos coeficientes encontrados pela partição mensal. A radiação solar média anual estimada encontrada na região foi de 19,66 MJ/m²dia, com o valor mínimo de 14,45 MJ/m²dia no mês de junho e máximo de 23,94 MJ/m²dia em novembro.

Entre as culturas responsáveis pela maior produção no perímetro, a que requer uma maior demanda de água é a cultura de batata-doce, seguido da mandioca, aipim, tomate, pimenta e quiabo. A demanda máxima para irrigação foi de 62,3 m³/dia por hectare para novembro e dezembro e menor de 38 m³/dia por hectare nos meses de junho e julho.

Os índices de radiação solar estimados mostraram que a região estudada possui um elevado potencial para o uso de energia solar em geral. Especificamente para a irrigação no perímetro irrigado Piauí utilizando a tecnologia SFVI, para suprir a demanda hídrica em cada 0,5 ha em sistemas de 5 a 60 m.c.a são requeridas potências instalas de 310 Wp a 3,4 kWp. O gráfico elaborado e disponibilizado no apêndice D serve como um guia rápido para o dimensionamento do SFVI no local de estudo.

Foi constatado que existe um potencial para o uso de SFVI para a irrigação na região estudada, porém, para alcançar um nível de competitividade econômica com o sistema de geração de energia convencional, os sistemas fotovoltaicos não podem ultrapassar uma altura manométrica de 30 m.c.a para cada 0,5 ha, o que na prática limita esses sistemas a uma captação de água em poços com profundidade inferiores próximas a 30 m. Para poços profundos de até 60 m, pode-se combinar as duas tecnologias e destinar 10 m.c.a para o uso direto em irrigação, mantendo a competitividade econômica. Fica claro que a aplicabilidade desses sistemas irá depender de cada porção de território individualmente e da sua disponibilidade hídrica.

Na análise econômica foi concluído que os preços elevados dos módulos fotovoltaicos têm um peso essencial na redução de competitividade desses sistemas, é preciso que se busque

meios para a redução do preço final desses produtos no Brasil de forma que possam ser mais competitivos na situação prática.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho avaliou o potencial do uso da energia solar fotovoltaica para a irrigação no Perímetro Irrigado Piauí a partir da obtenção dos dados de recursos energéticos disponíveis e demandas hídricas, obviamente este estudo se apresenta em caráter preliminar, de forma que se propôs a avaliar os aspectos gerais das variáveis envolvidas. Segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

Investigar o dimensionamento, de forma mais detalhada, levando em consideração a data do plantio das culturas, área efetivamente cultivada e estágio fenológico das culturas. Um trabalho nesse sentido poderá dimensionar sistemas mais apropriados para cada caso e reduzir os investimentos iniciais.

Realizar um estudo para o uso de sistemas híbridos de irrigação, unindo a energia solar fotovoltaica com a energia eólica ou elétrica convencional.

Construir um experimento de um SFVI no perímetro irrigado Piauí, simulando as demandas hídricas e as alturas manométricas para avaliar o seu comportamento nas condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop eaptranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. In: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rome/Italy: Estudio FAO, 1998. N. 56.

ALONSO, M C. **Observatório de energias renováveis para América Latina e Caribe: Energia Solar Fotovoltaica**. ONUDI, 2011.

ALVARENGA, C. **Bombeamento de água com energia fotovoltaica. Manual Técnico: Solenerg Engenharia**. Disponível em: www.solenerg.com.br. Acesso em: 12 ago 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil 2013**. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em 01 jul 2014.

ASMUS, H, E. **Pesquisa e a Questão Ambiental**. Traduzido de Cotgrove, 1982. Adaptado pelos autores na estruturação do Paradigma Perceptivo. In IV Seminário Nacional sobre Universidade e Meio Ambiente. Florianópolis: UFSC, 1990

BARBOSA, G. S. **O Desafio do Desenvolvimento Sustentável**. Revista Visões 4ª Edição, Nº4, Volume 1 - Jan/Jun 2008.

BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de agricultura para o desenvolvimento de 2008**. Washington. USA. Disponível em:<
http://siteresources.worldbank.org/INTWDRS/Resources/477365-1327599046334/8394679-1327614067045/FINAL_WDR-OV-Portuguese-text_9.26.07.pdf>

BIONE, J. **Análise do Sistema de Irrigação na Região semi-árida do nordeste utilizando o bombeamento de água acionado por geradores fotovoltaicos com concentrado tipo V.** Recife, 2006. 167 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. UFPE. Recife. 2006.

BRITO, A. U. **Otimização de acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas.** São Paulo, 2006. 99p. Tese (Doutorado em Energia). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia. USP. São Paulo. 2006

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil.** Revista Brasileira de Agrometeorologia. v.5 (1): 89-97, 1997.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; Costa, J. R.; Cruz, F. A. **Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, RJ, utilizando lisímetro de pesagem.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.14, p.108-116, 2006.

COSTA, H. S. “ÁGUA DO SOL” – **Uso da energia solar fotovoltaica na pequena irrigação de base familiar no semi-árido brasileiro.** Avances em Energías Renovables y Meio Ambiente. Vol. 10. 2006. Buenos Aires. Argentina

COHIDRO. **Perímetro irrigado Piauí.** Disponível em: <http://www.cohidro.se.gov.br/modules/tinyd0/index.php?id=23>>. Acesso em 17 de outubro. 2013.

CRESESB/CEPEL - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 05 out. 2014.

CRESESB/CEPEL - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Energia solar: Princípios e aplicações.** 2007. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 05 nov. 2014.

CHIGUERU, T. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos.** UFPE. 2000. Disponível em:<
http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>.

DALLACORT, R et al. **Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a região de Palotina, estado do Paraná.** Acta Scientiarum. Agronomy, v.26, p.329-336, 2004. Dantas, A. A.; Carvalho, L. G. de; Ferreira, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. Ciência e Agrotecnologia, v.27, p.1260-1263, 2003

DIAS, Sergio Cassoli. **Shell Solar: eletrificação rural e desenvolvimento sustentável.** ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL ,Campinas, 2000. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100048&lng=en&nrm=abn>. Acesso em : 02 Dez. 2014.

DORNELAS, K, D, et al. **Coeficientes médios da equação de Angstrom-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.41, n.8, p.1213-1219, ago, 2006.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes.** 2 Ed. New York:John Wiley & Sons, 1991.

EMBRAPA, **Sistema de Produção de Melancia.** Disponível em <
<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melancia/SistemaProducaoMelancia/irrigacao.htm>> Acesso em 22 dez 2014

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaico**. São Paulo, 1997. 162 p. Dissertação (Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo.

FEDRIZZI, M. C. 2003. **Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos**. 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP). Disponível em <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100034&lng=en&nrm=iso>

FERREIRA, V, M. **Irrigação e Drenagem**, Editora Floriano. Piauí. 2011

FRANKLIN, T, N. **Simulação de um Sistema de Bombeamento d'água Empregando Energia Solar Fotovoltaica**, Salvador, BA, Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFBA.

GREENPRO – Portal Energias Renováveis. **Energia Fotovoltaica – manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. Portugal. 2004. Disponível em:< <http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>

HAMIDAT, A.; BENYUCEF, B. **Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems**. Renew Energy. 2007. Disponível em:< www.sciencedirect.com>. Acesso em: 18 nov.2014.

HERNANDEZ ABREU, J. M.; PEREZ REGALADO, A.; RODRIGO LOPEZ, J.; GONZALEZ HERNANDEZ, J.F. El Riego localizado. **Curso internacional de Riego localizado**. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987. 317 p.

IEA. **World Energy Outlook 2010**. International Energy Agency. Paris, 2010.

MELO, E. **Temos de rediscutir a matriz energética nacional?**. Associação brasileira de **energia eólica**. Disponível em:< <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/artigos/1100-tempos-de-rediscutir-a-matriz-energ%C3%A9tica-nacional.html>> UFSC. 2015. Acesso em: 10/11/2015.

MELO, J.F. **Custos de irrigação por aspersão em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ.,1993. 147 p. (Tese-Mestrado em Engenharia Agrícola)

MELO, R, O. **Condicionamento de Potência de uma Bomba em um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico Através de Conversor de Frequência**. Recife, PE. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2004.

MORALES, L, R. **A Utilização de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento para Irrigação em Pequenas Propriedades Rurais**, Dissertação, Programa de Pós Graduação em Energia. USP, 2011.

MOREIRA, H, M. **Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação**, Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, UFV, 2002.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinklers Manufacturing Corp., 1975. 133 p

KOLLING, E. M.; SOUZA, S. N. M., RICIERI. **Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.3, p.527-535, set./dez. 2004.

OLIVEIRA, A. S. **Fundamentos de meteorologia e climatologia**. Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS)/UFRB. 2002.

OLIVEIRA, S.H.F. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo**. 1997. 240 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Interunidades (EP, FEA, IEE, IF), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PRADO, R et al. **Levantamento do Estado da Arte: Energia Solar**. Projeto Tecnologias para construção habitacional mais saudável. Finep, São Paulo, 2007.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21century. **Renowables 2012 Global Status Report**. Disponível em :< <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/06/2012KFen.pdf>> Acesso em 18/10/2014

SILVA, E. **Tutorial da Célula Solar**. Programa de Educação Tutorial. Engenharia de Telecomunicações. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro. 2006

SILVA, M. **Meteorologia e Climatologia** – Versão digital 2. Recife. 2006

SEPLANTEC, 2002. **Projeto Cadastro da Infra-Estrutura Hídrica do Nordeste: Diagnóstico do Município de Lagarto**. Goverdo do Estado de Sergipe. Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia Superintendência de Recursos Hídricos. Sergipe. 2002.

TIBA, 2000. **Novos coeficientes de Angstrom para a estimacão da radiação solar no nordeste do Brasil**. Departamento de energia nuclear. UFPE. 2000

TRENBERTH, K, et al. Earth`s global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society. 2009. Disponível em :< <http://www.cgd.ucar.edu/staff/trenbert/trenberth.papers/BAMSmarTrenberth.pdf>>. Acesso em: mar. 2016.

MELLENDEZ, T. A. **Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. Programa de PósGraduação em Energia da Universidade de São Paulo. Dissertação. USP. São Paulo.2009

WILLMOTT, C.J. **On the validation of models**. Physical Geography, v. 2, p. 184-194, 1981.

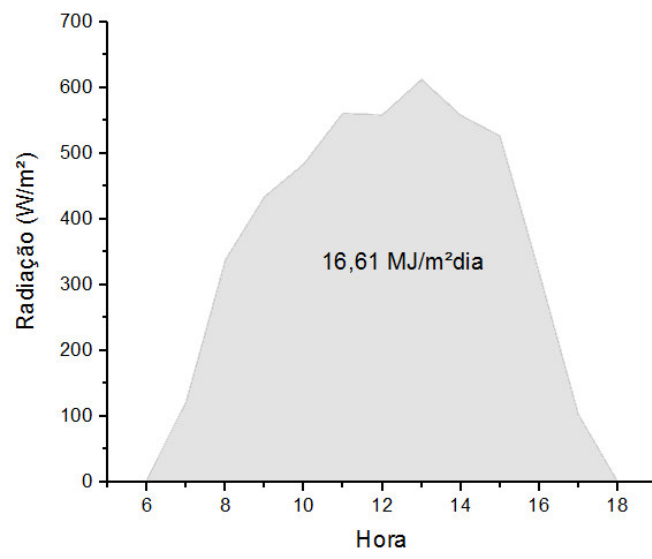
APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA EM ITABAIANINHA

Os dados do fornecidos pelo INMET foram tabulados como segue no exemplo para o dia 28/05/2012.

Hora	Radiação Global (kJ/m²)
6	10.8
7	437.0
8	1215.7
9	1559.3
10	1740.5
11	2018.5
12	2008.6
13	2202.4
14	2006.4
15	1893.4
16	1147.7
17	368.1
18	1.2

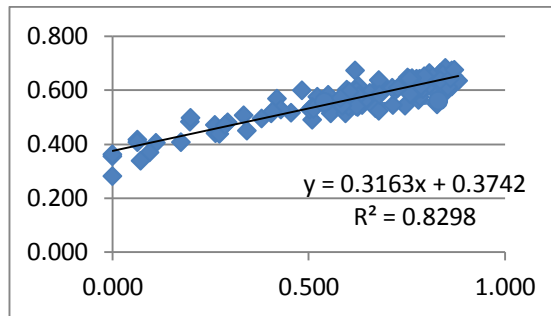
A radiação acumulada por dia representa o somatório das parcelas horárias que neste exemplo resulta no valor de 16,61 MJ/m²dia.

Segue abaixo a curva representativa da radiação solar para este dia específico.

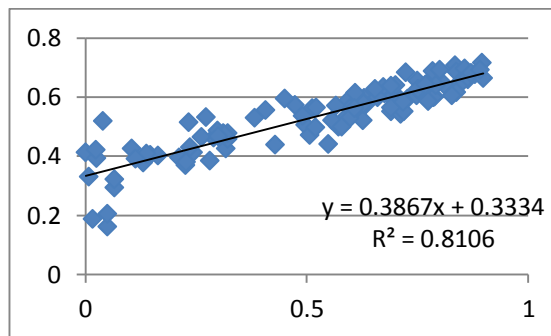


**APÊNDICE B - GRÁFICOS DE OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE
ANGSTROM PRESCOTT PARA A PARTIÇÃO MENSAL E PARTIÇÃO POR
PERÍODO SECO/CHUVOSO**

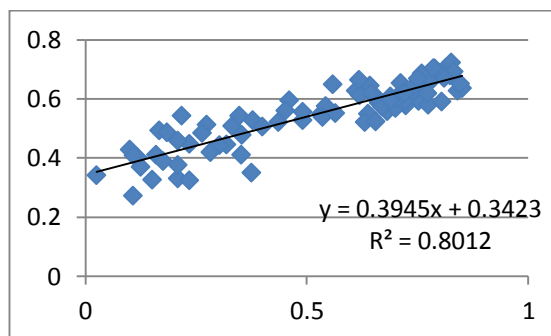
JAN



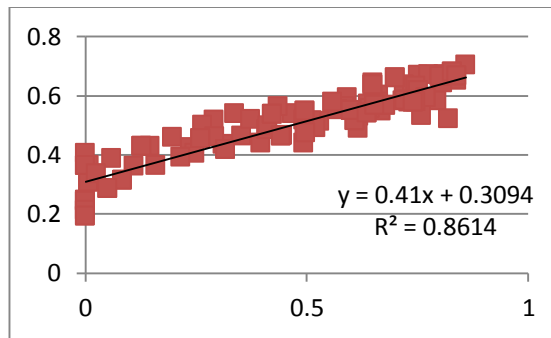
FEV



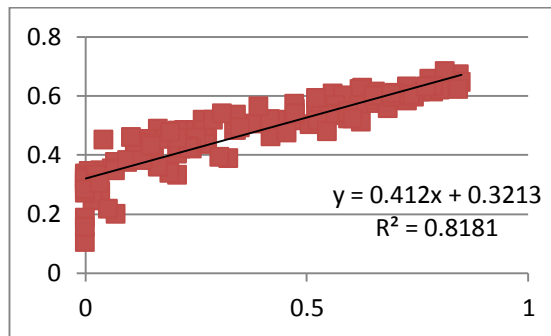
MAR



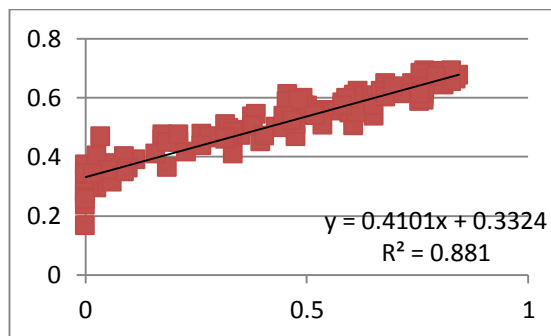
ABR



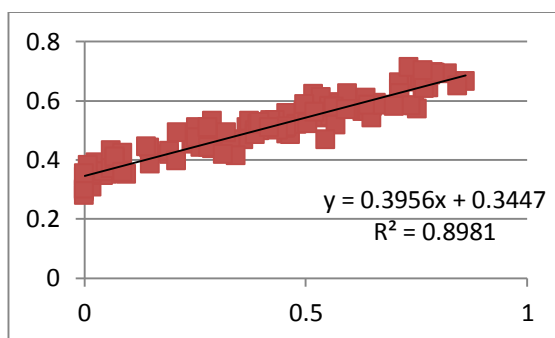
MAI



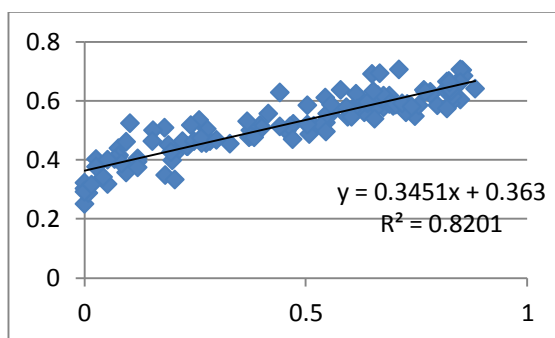
JUN



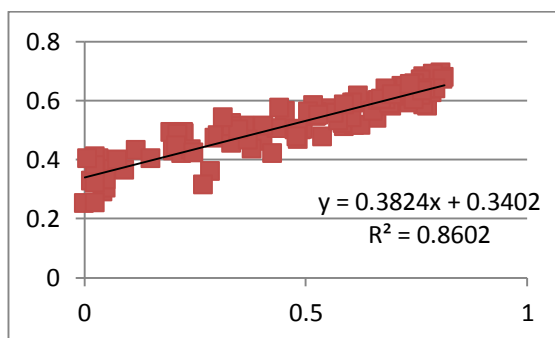
JUL



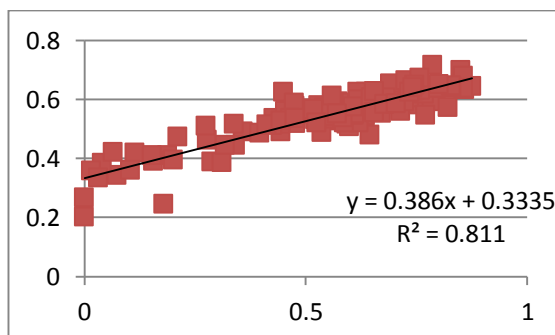
AGO



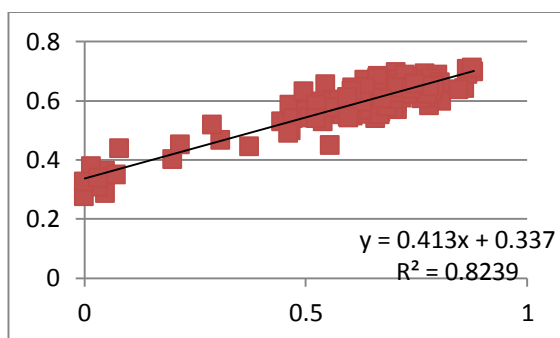
SET



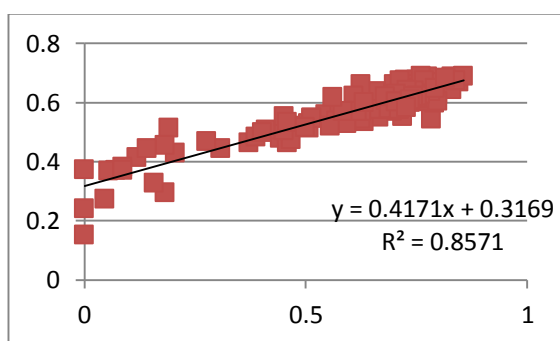
OUT



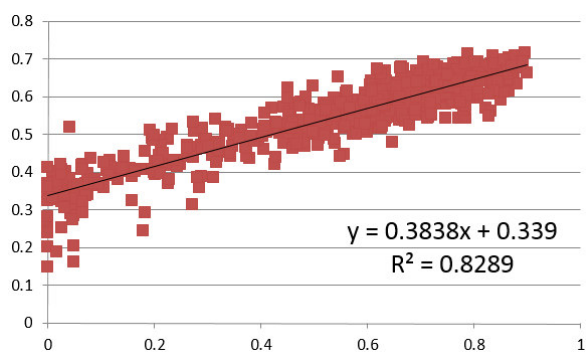
NOV



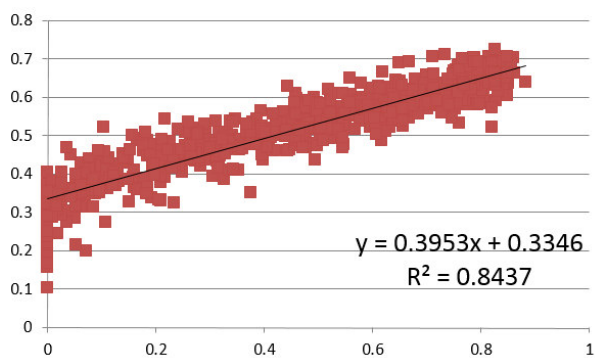
DEZ



PERÍODO SECO



PERÍODO CHUVOSO



APÊNDICE C – EXEMPLO DE PLANILHA PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA INSTALADA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Neste exemplo, temos o cálculo da potência instalada para as maiores demandas no lote padrão de 0,5 ha e altura manométrica de 30 m.c.a.

Mês	Demanda (m³/dia)	AMT (m.c.a)	E _H (Wh/dia)	L (Wh/dia)	(HSP) _β (kwh/m²dia)	P (Wp)
Jan	30.59	30	2500.73	8335.78	5.89	1769.05
Fev	30.59	30	2500.73	8335.78	5.95	1751.21
Mar	29.50	30	2411.63	8038.75	6.22	1615.50
Abr	28.41	30	2322.52	7741.73	5.24	1846.79
Mai	24.58	30	2009.42	6698.05	4.81	1740.66
Jun	21.85	30	1786.24	5954.13	4.4	1691.51
Jul	21.85	30	1786.24	5954.13	4.56	1632.16
Ago	23.49	30	1920.31	6401.03	5.21	1535.75
Set	27.32	30	2233.41	7444.70	5.76	1615.60
Out	31.14	30	2545.70	8485.65	6.01	1764.90
Nov	31.14	30	2545.70	8485.65	6.35	1670.40
Dez	31.14	30	2545.70	8485.65	5.97	1776.73

Segue o cálculo detalhado da potência de instalação para o mês de Abril:

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot \text{AMT}$$

$$E_H = 2,725 \cdot 28,41 \cdot 30$$

$$E_H = 2322,52 \text{ Wh/dia}$$

$$L = \frac{E_H}{\eta_{\text{motobomba}}}$$

$$L = 2322,52 / 0,3^*$$

$$L = 7741,73 \text{ Wh/dia}$$

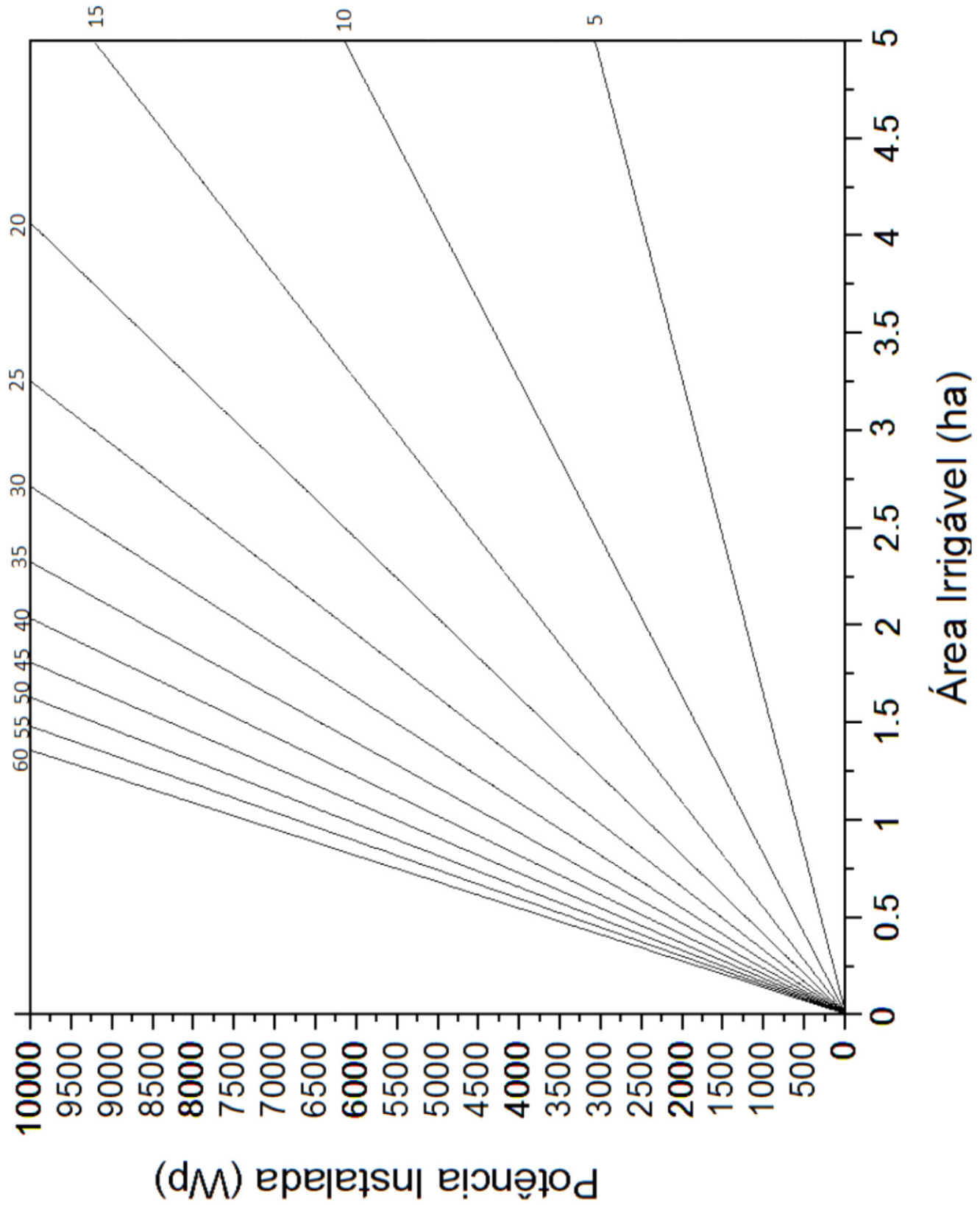
$$P_{(Wp)} = 1,25 \cdot \frac{L}{(HSP)_\beta}$$

$$P_{(Wp)} = 1,25 \cdot (7741,73 / 5,24)$$

$$P_{(Wp)} = 1846.79 \text{ Wp}$$

* Rendimento médio de 30% do conjunto motobomba

APÊNDICE D – GRÁFICO PARA O DIMENSIONAMENTO DO SFVI NO LOCAL DE ESTUDO



APÊNDICE E - PLANILHAS DETALHADAS REFERENTES À ANÁLISE COMPARATIVA

Para o sistema fotovoltaico:

- Foi considerado o preço dos módulos fotovoltaicos de 7,69 R\$/Wp;
- O item O&M (operação e manutenção) é de 2 % do investimento inicial por ano;
- O tempo de reposição da bomba e do conversor de frequência foi considerado de 10 anos que é o tempo de vida útil desses equipamentos;
- O custo da motobomba e do dispositivo de condicionamento de potência varia de acordo com a potência necessária*.

Para o sistema convencional:

- Foi considerado o preço das 14 bombas convencionais no valor de R\$ 35.000,00 para irrigação total dos 415 ha dividido pelo lote padrão de 0,5 ha (R\$ 590,36);
- O tempo de reposição das bombas foi considerado de 10 anos que é o seu tempo de vida útil;
- A tarifa de energia considerada foi de 0,2652 R\$/kWh** que é a tarifa cobrada para serviço público de irrigação. O valor da energia consumida levou em consideração o valor necessário de potência consumida para a maior demanda encontrada em cada mês.

* cotações em www.brasilbombas.com.br; www.somar.com.br; www.agrotama.com.br.

**Tarifa pesquisada em 03/11/2015 em www.energisa.com.br.

A planilha detalhada do custo do sistema convencional é fixa e segue:

Sistema Convencional		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	590.36	590.36
1	952.34	1542.70
2	952.34	2495.03
3	952.34	3447.37
4	952.34	4399.71
5	952.34	5352.04
6	952.34	6304.38
7	952.34	7256.71
8	952.34	8209.05
9	952.34	9161.39
10	1542.70	10704.08
11	952.34	11656.42
12	952.34	12608.76
13	952.34	13561.09
14	952.34	14513.43
15	952.34	15465.77
16	952.34	16418.10
17	952.34	17370.44
18	952.34	18322.77
19	952.34	19275.11
20	1542.70	20817.81
21	952.34	21770.14
22	952.34	22722.48
23	952.34	23674.82
24	952.34	24627.15
25	952.34	25579.49
26	952.34	26531.83
27	952.34	27484.16
28	952.34	28436.50
29	952.34	29388.83
30	952.34	30341.17

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 5 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	308
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	2368.52
Preço da motobomba (R\$)	450
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	496
Área requerida (m²)	2.156
Investimento inicial (R\$)	3314.52
O&M (Operação e Manutenção) (R\$)	66.3

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	3314.52	3314.52
1	66.3	3380.8
2	66.3	3447.1
3	66.3	3513.4
4	66.3	3579.7
5	66.3	3646.0
6	66.3	3712.3
7	66.3	3778.6
8	66.3	3844.8
9	66.3	3911.1
10	1014.4	4925.6
11	66.3	4991.9
12	66.3	5058.2
13	66.3	5124.5
14	66.3	5190.7
15	66.3	5257.0
16	66.3	5323.3
17	66.3	5389.6
18	66.3	5455.9
19	66.3	5522.2
20	1014.4	6536.6
21	66.3	6602.9
22	66.3	6669.2
23	66.3	6735.5
24	66.3	6801.8
25	66.3	6868.1
26	66.3	6934.4
27	66.3	7000.7
28	66.3	7067.0
29	66.3	7133.3
30	66.3	7199.5

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 10 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	610
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	4690.9
Preço da motobomba (R\$)	450
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	496
Área requerida (m²)	4.27
Investimento inicial (R\$)	5636.9
O&M (Operação e Manutenção) (R\$)	112.7

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	5636.9	5636.9
1	112.7	5749.6
2	112.7	5862.4
3	112.7	5975.1
4	112.7	6087.9
5	112.7	6200.6
6	112.7	6313.3
7	112.7	6426.1
8	112.7	6538.8
9	112.7	6651.5
10	1063.0	7714.6
11	112.7	7827.3
12	112.7	7940.0
13	112.7	8052.8
14	112.7	8165.5
15	112.7	8278.2
16	112.7	8391.0
17	112.7	8503.7
18	112.7	8616.5
19	112.7	8729.2
20	1063.0	9792.2
21	112.7	9904.9
22	112.7	10017.7
23	112.7	10130.4
24	112.7	10243.2
25	112.7	10355.9
26	112.7	10468.6
27	112.7	10581.4
28	112.7	10694.1
29	112.7	10806.8
30	112.7	10919.6

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 15 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	920
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	7074.8
Preço da motobomba (R\$)	750
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	620
Área requerida (m²)	6.44
Investimento inicial (R\$)	8444.8
O&M	168.9

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	8444.8	8444.8
1	168.9	8613.7
2	168.9	8782.6
3	168.9	8951.5
4	168.9	9120.4
5	168.9	9289.3
6	168.9	9458.2
7	168.9	9627.1
8	168.9	9796.0
9	168.9	9964.9
10	1545.3	11510.2
11	168.9	11679.1
12	168.9	11848.0
13	168.9	12016.9
14	168.9	12185.8
15	168.9	12354.7
16	168.9	12523.6
17	168.9	12692.5
18	168.9	12861.4
19	168.9	13030.3
20	1545.3	14575.6
21	168.9	14744.5
22	168.9	14913.4
23	168.9	15082.3
24	168.9	15251.2
25	168.9	15420.1
26	168.9	15589.0
27	168.9	15757.9
28	168.9	15926.8
29	168.9	16095.7
30	168.9	16264.6

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 20 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	1230
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	9458.7
Preço da motobomba (R\$)	900
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	750
Área requerida (m²)	8.61
Investimento inicial (R\$)	11108.7
O&M	222.2

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	11108.7	11108.7
1	222.2	11330.9
2	222.2	11553.0
3	222.2	11775.2
4	222.2	11997.4
5	222.2	12219.6
6	222.2	12441.7
7	222.2	12663.9
8	222.2	12886.1
9	222.2	13108.3
10	1880.8	14989.1
11	222.2	15211.2
12	222.2	15433.4
13	222.2	15655.6
14	222.2	15877.7
15	222.2	16099.9
16	222.2	16322.1
17	222.2	16544.3
18	222.2	16766.4
19	222.2	16988.6
20	1880.8	18869.4
21	222.2	19091.6
22	222.2	19313.7
23	222.2	19535.9
24	222.2	19758.1
25	222.2	19980.3
26	222.2	20202.4
27	222.2	20424.6
28	222.2	20646.8
29	222.2	20869.0
30	222.2	21091.1

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 25 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	1530
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	11765.7
Preço da motobomba (R\$)	900
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	750
Área requerida (m²)	10.71
Investimento inicial (R\$)	13415.7
O&M	268.3

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	13415.7	13415.7
1	268.3	13684.0
2	268.3	13952.3
3	268.3	14220.6
4	268.3	14489.0
5	268.3	14757.3
6	268.3	15025.6
7	268.3	15293.9
8	268.3	15562.2
9	268.3	15830.5
10	1929.0	17759.6
11	268.3	18027.9
12	268.3	18296.2
13	268.3	18564.5
14	268.3	18832.8
15	268.3	19101.1
16	268.3	19369.4
17	268.3	19637.7
18	268.3	19906.1
19	268.3	20174.4
20	1929.0	22103.4
21	268.3	22371.7
22	268.3	22640.0
23	268.3	22908.3
24	268.3	23176.7
25	268.3	23445.0
26	268.3	23713.3
27	268.3	23981.6
28	268.3	24249.9
29	268.3	24518.2
30	268.3	24786.5

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 30 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	1840
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	14149.6
Preço da motobomba (R\$)	1000
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	800
Área requerida (m²)	12.88
Investimento inicial (R\$)	15949.6
O&M	319.0

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	15949.6	15949.6
1	319.0	16268.6
2	319.0	16587.6
3	319.0	16906.6
4	319.0	17225.6
5	319.0	17544.6
6	319.0	17863.6
7	319.0	18182.5
8	319.0	18501.5
9	319.0	18820.5
10	2131.9	20952.4
11	319.0	21271.4
12	319.0	21590.4
13	319.0	21909.4
14	319.0	22228.4
15	319.0	22547.4
16	319.0	22866.4
17	319.0	23185.3
18	319.0	23504.3
19	319.0	23823.3
20	2131.9	25955.2
21	319.0	26274.2
22	319.0	26593.2
23	319.0	26912.2
24	319.0	27231.2
25	319.0	27550.2
26	319.0	27869.2
27	319.0	28188.1
28	319.0	28507.1
29	319.0	28826.1
30	319.0	29145.1

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 35 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	2150
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	16533.5
Preço da motobomba (R\$)	1300
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	900
Área requerida (m²)	15.05
Investimento inicial (R\$)	18733.5
O&M	374.7

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	18733.5	18733.5
1	374.7	19108.2
2	374.7	19482.8
3	374.7	19857.5
4	374.7	20232.2
5	374.7	20606.9
6	374.7	20981.5
7	374.7	21356.2
8	374.7	21730.9
9	374.7	22105.5
10	2589.7	24695.3
11	374.7	25069.9
12	374.7	25444.6
13	374.7	25819.3
14	374.7	26193.9
15	374.7	26568.6
16	374.7	26943.3
17	374.7	27317.9
18	374.7	27692.6
19	374.7	28067.3
20	2589.7	30657.0
21	374.7	31031.7
22	374.7	31406.3
23	374.7	31781.0
24	374.7	32155.7
25	374.7	32530.4
26	374.7	32905.0
27	374.7	33279.7
28	374.7	33654.4
29	374.7	34029.0
30	374.7	34403.7

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 40 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	2460
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	18917.4
Preço da motobomba (R\$)	1300
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	900
Área requerida (m²)	17.22
Investimento inicial (R\$)	21117.4
O&M	422.3

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	21117.4	21117.4
1	422.3	21539.7
2	422.3	21962.1
3	422.3	22384.4
4	422.3	22806.8
5	422.3	23229.1
6	422.3	23651.5
7	422.3	24073.8
8	422.3	24496.2
9	422.3	24918.5
10	2639.6	27558.1
11	422.3	27980.4
12	422.3	28402.8
13	422.3	28825.1
14	422.3	29247.5
15	422.3	29669.8
16	422.3	30092.2
17	422.3	30514.5
18	422.3	30936.9
19	422.3	31359.2
20	2639.6	33998.8
21	422.3	34421.1
22	422.3	34843.5
23	422.3	35265.8
24	422.3	35688.2
25	422.3	36110.5
26	422.3	36532.9
27	422.3	36955.2
28	422.3	37377.6
29	422.3	37799.9
30	422.3	38222.3

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 45 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	2770
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	21301.3
Preço da motobomba (R\$)	1600
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	1350
Área requerida (m²)	19.39
Investimento inicial (R\$)	24251.3
O&M	485.0

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	24251.3	24251.3
1	485.0	24736.3
2	485.0	25221.4
3	485.0	25706.4
4	485.0	26191.4
5	485.0	26676.4
6	485.0	27161.5
7	485.0	27646.5
8	485.0	28131.5
9	485.0	28616.5
10	3454.4	32071.0
11	485.0	32556.0
12	485.0	33041.0
13	485.0	33526.0
14	485.0	34011.1
15	485.0	34496.1
16	485.0	34981.1
17	485.0	35466.1
18	485.0	35951.2
19	485.0	36436.2
20	3454.4	39890.6
21	485.0	40375.6
22	485.0	40860.7
23	485.0	41345.7
24	485.0	41830.7
25	485.0	42315.7
26	485.0	42800.8
27	485.0	43285.8
28	485.0	43770.8
29	485.0	44255.8
30	485.0	44740.9

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 50 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	3077
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	23662.13
Preço da motobomba (R\$)	1600
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	1350
Área requerida (m²)	21.539
Investimento inicial (R\$)	26612.13
O&M	532.2

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	26612.13	26612.13
1	532.2	27144.4
2	532.2	27676.6
3	532.2	28208.9
4	532.2	28741.1
5	532.2	29273.3
6	532.2	29805.6
7	532.2	30337.8
8	532.2	30870.1
9	532.2	31402.3
10	3503.8	34906.1
11	532.2	35438.3
12	532.2	35970.6
13	532.2	36502.8
14	532.2	37035.1
15	532.2	37567.3
16	532.2	38099.6
17	532.2	38631.8
18	532.2	39164.0
19	532.2	39696.3
20	3503.8	43200.1
21	532.2	43732.3
22	532.2	44264.5
23	532.2	44796.8
24	532.2	45329.0
25	532.2	45861.3
26	532.2	46393.5
27	532.2	46925.8
28	532.2	47458.0
29	532.2	47990.2
30	532.2	48522.5

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 55 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	3386
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	26038.34
Preço da motobomba (R\$)	2200
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	1800
Área requerida (m²)	23.702
Investimento inicial (R\$)	30038.34
O&M	600.8

Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	30038.34	30038.34
1	600.8	30639.1
2	600.8	31239.9
3	600.8	31840.6
4	600.8	32441.4
5	600.8	33042.2
6	600.8	33642.9
7	600.8	34243.7
8	600.8	34844.5
9	600.8	35445.2
10	4624.5	40069.7
11	600.8	40670.5
12	600.8	41271.2
13	600.8	41872.0
14	600.8	42472.8
15	600.8	43073.5
16	600.8	43674.3
17	600.8	44275.1
18	600.8	44875.8
19	600.8	45476.6
20	4624.5	50101.1
21	600.8	50701.8
22	600.8	51302.6
23	600.8	51903.4
24	600.8	52504.1
25	600.8	53104.9
26	600.8	53705.7
27	600.8	54306.4
28	600.8	54907.2
29	600.8	55508.0
30	600.8	56108.7

Planilha detalhada de custo referente ao sistema fotovoltaico de 60 m.c.a

Potência Requerida (Wp)	3694
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	28406.86
Preço da motobomba (R\$)	2200
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	1800
Área requerida (m²)	25.858
Investimento inicial (R\$)	32406.86
O&M	648.1

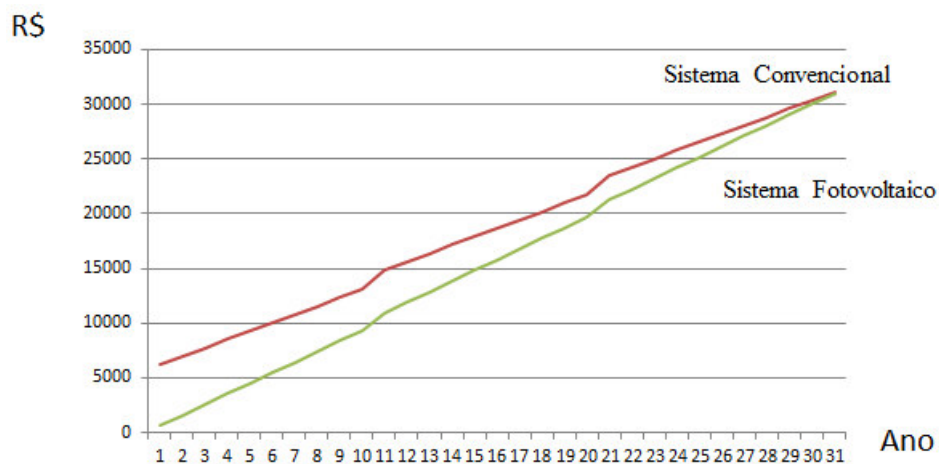
Sistema Fotovoltaico		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	32406.86	32406.86
1	648.1	33055.0
2	648.1	33703.1
3	648.1	34351.3
4	648.1	34999.4
5	648.1	35647.5
6	648.1	36295.7
7	648.1	36943.8
8	648.1	37592.0
9	648.1	38240.1
10	4674.0	42914.1
11	648.1	43562.2
12	648.1	44210.4
13	648.1	44858.5
14	648.1	45506.6
15	648.1	46154.8
16	648.1	46802.9
17	648.1	47451.1
18	648.1	48099.2
19	648.1	48747.3
20	4674.0	53421.3
21	648.1	54069.5
22	648.1	54717.6
23	648.1	55365.7
24	648.1	56013.9
25	648.1	56662.0
26	648.1	57310.1
27	648.1	57958.3
28	648.1	58606.4
29	648.1	59254.6
30	648.1	59902.7

Planilhas referentes ao sistema bomba elétrica submersa / sistema fotovoltaico de irrigação

Potência Requerida (Wp)	677
Preço dos módulos (R\$/Wp)	7.69
Preço total do modulo fotovoltaico (R\$)	5206.13
Preço da motobomba (R\$)	500
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	537
Área requerida (m²)	4.739
Investimento inicial (R\$)	6243.13
O&M	124.9

Sistema Fotovoltaico			Sistema Convencional		
Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)	Ano	Custo Anual (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	6243.13	6243.13	0	616.8	616.8
1	759.0	7002.1	1	971.46	1588.26
2	759.0	7761.2	2	971.46	2559.73
3	759.0	8520.2	3	971.46	3531.19
4	759.0	9279.2	4	971.46	4502.65
5	759.0	10038.2	5	971.46	5474.12
6	759.0	10797.2	6	971.46	6445.58
7	759.0	11556.2	7	971.46	7417.04
8	759.0	12315.3	8	971.46	8388.51
9	759.0	13074.3	9	971.46	9359.97
10	1800.8	14875.0	10	1588.26	10948.23
11	759.0	15634.0	11	971.46	11919.70
12	759.0	16393.1	12	971.46	12891.16
13	759.0	17152.1	13	971.46	13862.63
14	759.0	17911.1	14	971.46	14834.09
15	759.0	18670.1	15	971.46	15805.55
16	759.0	19429.1	16	971.46	16777.02
17	759.0	20188.1	17	971.46	17748.48
18	759.0	20947.2	18	971.46	18719.94
19	759.0	21706.2	19	971.46	19691.41
20	1800.8	23506.9	20	1588.26	21279.67
21	759.0	24265.9	21	971.46	22251.13
22	759.0	25025.0	22	971.46	23222.60
23	759.0	25784.0	23	971.46	24194.06
24	759.0	26543.0	24	971.46	25165.52
25	759.0	27302.0	25	971.46	26136.99
26	759.0	28061.0	26	971.46	27108.45
27	759.0	28820.0	27	971.46	28079.91
28	759.0	29579.1	28	971.46	29051.38
29	759.0	30338.1	29	971.46	30022.84
30	759.0	31097.1	30	971.46	30994.30

Vazão da bomba	Tempo de func.	Pot.bomba (kW)	Pot.consumida	Tarifa	Preço	Preço+impostos
6	5.10	1.1	5.608166667		42.85828265	58.5841157
6	5.10	1.1	5.608166667		40.09323215	55.53094634
6	4.92	1.1	5.408333333		41.33113233	56.89783632
6	4.73	1.1	5.207583333		38.5132033	53.78627908
6	4.10	1.1	4.506333333		34.43794009	49.28637345
6	3.64	1.1	4.005833333		29.625541	43.97252237
6	3.64	1.1	4.005833333		30.61305903	45.06293978
6	3.92	1.1	4.3065		31.8491514	46.42783298
6	4.55	1.1	5.00775		38.26982643	53.51754234
6	4.73	1.1	5.207583333		38.5132033	53.78627908
6	5.19	1.1	5.708083333		42.2147011	57.87347295
6	5.19	1.1	5.708083333		43.6218578	59.42725539
				TOTAL	451.941131	634.1533964



ANEXO A – CATÁLOGO DE BOMBAS

MODELO	POTÊNCIA (kW)		SUÇUÇÃO (mm)		MONOFÁSICO	TRIFÁSICO	Ø DO ROTOR (mm)	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (mca)																																								DRENAGEM MAX. (mm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	1	2	3	4				5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	43	45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
SHX	1/4	3/4	3/4	X	-	110	4,8	4,5	4,3	3,9	3,6	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,6	1,3	0,9	0,6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

(*) *P. rotator* idéntica a encontrada nos muretes maciços das 1-5 ex.

MODELO	POTENCIA (cv)	Nº DE ESTÁGIOS	RECALQUE (mm)	MONOFÁSICO	TRIFÁSICO	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL (mca)																				PESADA MÁXIMA (kg)						
						10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	110	120		130	140	150	160	170	
BMSC-402/0,5-9	0,5	9	1,1/4	X		2,45	2,32	2,17	2,04	1,9	1,73	1,56	1,37	1,17	0,95	0,6	0,2															70
BMSC-404/0,5-7	0,5	7	1,1/4	X		4,15	3,93	3,6	3,42	3,15	2,87	2,55	2,16	1,7	1,08																	60
BMSC-404/0,75-9	0,75	9	1,1/4	X		*	4,16	4,0	3,78	3,60	3,4	3,2	3,0	2,76	2,54	2,3	2,0	1,6	1,1													79
BMSC-404/1,0-11	1,0	11	1,1/4	X		*	*	4,2	4,08	3,92	3,79	3,58	3,43	3,25	3,08	2,89	2,73	2,47	2,22	1,93	1,57											90
BMSC-404/1,5-15	1,5	15	1,1/4	X		*	*	*	4,14	4,03	3,92	3,82	3,72	3,61	3,48	3,36	3,24	3,11	3,0	2,87	2,73											127
BMSC-407/0,5-5	0,5	5	1,1/4	X		6,35	5,85	5,25	4,55	3,75	2,65	1,25																				45
BMSC-407/0,75-6	0,75	6	1,1/4	X		*	6,15	5,7	5,3	4,8	4,15	3,45	2,45	1,25																		63
BMSC-407/1,0-8	1,0	8	1,1/4	X		*	6,5	6,2	5,85	5,5	5,1	4,6	4,0	3,35	2,45	1,3																70
BMSC-407/1,5-10	1,5	10	1,1/4	X		*	*	*	*	6,45	6,15	5,9	5,6	5,3	4,9	4,55	4,1	3,55	2,9	2,1	1,0											88
BMSC-409/1,0-5	1,0	5	2	X		12,2	11,3	10,3	9,1	7,7	6,1	3,4																				44
BMSC-409/1,5-6	1,5	6	2	X		*	12,3	11,5	10,6	9,7	8,6	7,3	5,7	3,5																		66
BMSAF-404/0,5-7	0,5	7	1,1/4	X	X	4,15	3,93	3,6	3,42	3,15	2,87	2,55	2,16	1,7	1,08																	80
BMSAF-404/0,75-9	0,75	9	1,1/4	X	X	*	4,16	4,0	3,78	3,60	3,4	3,2	3,0	2,76	2,54	2,3	2,0	1,6	1,1													79
BMSAF-404/1,0-11	1,0	11	1,1/4	X	X	*	*	4,2	4,08	3,92	3,79	3,58	3,43	3,25	3,08	2,89	2,73	2,47	2,22	1,93	1,57											90
BMSAF-404/1,5-15	1,5	15	1,1/4	X	X	*	*	*	4,14	4,03	3,92	3,82	3,72	3,61	3,48	3,36	3,24	3,11	3,0	2,87	2,73	2,6	2,24	1,77	1,11							127
BMSAF-404/2,0-20	2,0	20	1,1/4	X	X	*	*	*	*	4,3	4,24	4,17	4,1	4,02	3,95	3,87	3,8	3,7	3,62	3,54	3,46	3,37	3,21	3,04	2,84	2,56	2,35	1,92	1,5	1,11		176
BMSAF-407/0,5-5	0,5	5	1,1/4	X	X	6,35	5,85	5,25	4,55	3,75	2,65	1,25																				45
BMSAF-407/0,75-6	0,75	6	1,1/4	X	X	*	6,15	5,7	5,3	4,8	4,15	3,45	2,45	1,25																		63
BMSAF-407/1,0-8	1,0	8	1,1/4	X	X	*	6,5	6,2	5,85	5,5	5,1	4,6	4,0	3,35	2,45	1,3																70
BMSAF-407/1,5-10	1,5	10	1,1/4	X	X	*	*	*	*	6,45	6,15	5,9	5,6	5,3	4,9	4,55	4,1	3,55	2,9	2,1	1,0											88
BMSAF-407/2,0-13	2,0	13	1,1/4	X	X	*	*	*	*	*	6,45	6,2	5,9	5,7	5,4	5,15	4,9	4,6	4,3	4,0	3,6	3,2	2,25	1,0								116
BMSAF-413/1,0-3	1,0	3	2	X	X	13,2	11,6	9,7	6,5																							28
BMSAF-413/1,5-4	1,5	4	2	X	X	*	13,5	12,3	10,8	8,9	6,1																					37
BMSAF-413/2,0-6	2,0	6	2	X	X	*	*	13,7	12,8	11,8	10,8	9,6	8,3	6,3	3,0																	27

ANEXO B – TABELA AUXILIAR PARA CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO PVC.

Perdas de Carga (perda equivalente em metros de altura manométrica para cada 100 m de tubulação)							
Vazão (L/h)	Diâmetro interno da tubulação (mm)						
	19	26	32	38	50	63	75
500	1,15						
1.000	4,65	1,15	0,23				
2.000	22,40	5,30	1,43	0,55			
3.000		9,90	2,50	1,00	0,50	0,18	
4.000		16,25	4,55	2,00	0,83	0,38	0,14
5.000			6,45	2,60	1,15	0,48	0,17
6.000			9,25	4,30	1,55	0,58	0,20
7.000			12,85	5,45	2,00	0,68	0,25
8.000			16,60	7,50	2,50	0,90	0,30
9.000				9,45	3,05	1,13	0,40
10.000				12,50	4,25	1,40	0,58
12.000				15,45	5,45	1,90	0,75
15.000				23,50	8,10	3,00	1,18

Perdas de Carga (m) por tipo de conexão – Equivalência em metros lineares de tubulação de mesmo diâmetro interno			
Conexão	Diâmetro interno da tubulação (mm)		
	32	50	63
Joelho 45°	0,274	0,457	0,610
Joelho 90°	0,457	0,762	1,067
T	0,762	1,067	1,524
Válvula Globo	7,620	13,716	16,764
Válvula Gaveta	0,183	0,305	0,396
Válvula de Retenção	0,914	1,524	2,134